

# Non-Waste-Wachsschalungen



Technische  
Universität  
Braunschweig



INSTITUT FÜR TRAGWERKSENTWURF  
INSTITUTE FOR STRUCTURAL DESIGN

Dipl.-Ing. Jeldrik L.C. Mainka

ISBN 978-3-00-063017-0

Braunschweig, Juni 2019

# **Non-Waste-Wachsschalungen**

## **Entwicklung einer Wachsschalungstechnologie für geometrisch komplexe Betonbauteile**

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

### **Dissertation**

von  
Jeldrik Laurent Constantin Mainka  
geboren am 14.06.1979  
aus Braunschweig

Eingereicht am:  
23.10.2018  
Disputation am:  
13.03.2019

Berichterstatter:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann

(2019)





## Kurzfassung

### Non-Waste-Wachsschalungstechnologie

Beton ist vor seiner Erhärtung plastisch bis flüssig und besitzt das enorme Potential, beim Erstarren nahezu jede beliebige Schalungsform permanent zu materialisieren. Besonders in Zeiten der Ressourcenknappheit und günstigen Arbeitskraft zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde dieses Potential genutzt, um durch Anpassung der Bauteilgeometrie an den Kräfteverlauf filigrane und äußerst materialeffiziente Konstruktionen zu realisieren. Die eleganten gevouteten Brücken und Pilzdecken Maillart'scher Prägung verdeutlichen dieses Konzept eindrucksvoll.

Die heutigen marktgängigen Systemschalungen hingegen optimieren den Schalungsbau in anderer Hinsicht: Sie sind darauf ausgelegt, „günstigen“ Beton schnell und unter Reduktion von Arbeit in einfache Geometrien zu gießen, und werden dabei besonders den Potentialen neuer Hochleistungswerkstoffe wie UHPC (Ultrahochfester Beton) nicht gerecht. Es entstehen massenintensive Betonbauteile unter Einsatz von mehr Ressourcen (graue Energie / CO<sub>2</sub>) als nötig. Durch die Entwicklung digitaler Entwurfs- und Berechnungsprogramme ist es heute theoretisch möglich, in noch nie dagewesener Form filigrane und materialeffiziente Konstruktionen zu realisieren. Ihre Herstellung z.B. aus UHPC erfordert allerdings aufwendige, teure und abfallintensive Sonderschalungen, die nicht wirtschaftlich sind und als Grund gesehen werden können, warum solche Konstruktionen heute nur selten realisiert werden.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Mit der Entwicklung einer digital gefertigten, voll recycelbaren Non-Waste-Wachsschalungstechnologie soll die Lücke zwischen dem digital Planbaren und dem ökonomisch und ökologisch Umsetzbaren geschlossen werden. Diese mit dem Innovationspreis der Zulieferindustrie Betonbauteile 2017 ausgezeichnete Schalungstechnologie basiert dabei auf 100 % wiederverwendbaren technischen Wachsen, die mittels zerspanender CNC Bearbeitung geformt werden. Durch die erreichbare hochpräzise Formgebung ist sie neben Normalbeton insbesondere für feinkörnigen UHPC geeignet.

Zu Beginn erfolgt die Selektion eines geeigneten Wachses, wozu die definierten Anforderungen an Sonderschalungen mit den experimentell ermittelten Analyseergebnissen 29 unterschiedlicher Wachse verglichen werden. Neben der Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung großformatiger spannungsarmer Wachsböcke, werden im Folgenden die, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig ermittelten, optimierten Fräswerkzeuge und Bearbeitungsparameter dargestellt. Zur Evaluation der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie bezüglich Gestaltungsfreiheit und Präzision werden anschließend die hergestellten, unterschiedlich geometrisch komplexen Wachsschalungen und Betonbauteile mittels einer Form- und Maßanalyse bewertet.

Die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit wird ferner u.a. an verschiedenen realisierten Anwendungsbeispielen aufgezeigt und evaluiert. Zusätzlich wird die prinzipielle Anwendbarkeit von komplexen Wachs-Verdrängungskörpern (Hohlraum-Wachsschalungen) dargestellt. Abschließend werden Ausblicke auf weiterführende Forschungsprojekte am ITE zum Transfer der Technologie in die industrielle Anwendung gegeben.

**Schlagworte:** Schalungstechnologie; Wachs; Beton; Ressourceneffizienz; Leichtbau; Fertigungstechnik; Freiform, Recycling; Ultrahochfester Beton UHPC; Leichtbeton; Präzision

## Abstract

### Non-Waste-Wax-Formwork technology

*Novel precise formwork-technology on basis of 100% recyclable industrial wax for the fabrication of geometrically complex concrete elements*

Before curing concrete exists in a state between plastic and liquid and has the enormous potential to permanently materialize almost any formwork form during solidification. Especially in times of scarcity of resources and affordable manpower at the beginning of the 20th century this potential was used to realize filigree and highly material-efficient constructions by adapting the geometry to the flow of forces. The elegant vouched bridges and mushroom-shaped ceilings realized by Maillart impressively illustrate this concept.

Today's marketable system formwork, on the other hand, optimizes formwork construction in another respect: it is designed to pour "cheap" concrete quickly into simple geometries with a reduction in work, and does not do justice to the potential of new high-performance materials such as UHPC (Ultra High Strength Concrete). This results in mass-intensive concrete structural elements using more resources (grey energy / CO<sub>2</sub>) than necessary. Through the development of digital design and calculation programs, it is theoretically possible today to realize filigree and material-efficient constructions in an unprecedented form. Their production e.g. from UHPC, however, requires complex, expensive and waste-intensive special formwork, which is not economical and can be seen as a reason why such constructions have rarely been realized.

This is the starting point of this thesis. With the development of a digitally manufactured, fully recyclable Non-Waste-Wax-Formwork technology, the gap between the digitally plannable and the economically and ecologically feasible should be closed. This formwork technology, which was awarded with the innovation prize of the supplier industry for concrete components in 2017, is based on 100 % reusable technical waxes, which are formed using CNC machining. The high-precision shaping that can be achieved makes it in addition to normal concrete particularly suitable for fine-grained UHPC.

The first step is the selection of a suitable wax by comparing the defined requirements for special formwork with the experimentally determined analysis results of 29 different waxes. In addition to the development of a process for the production of large-format, low-stress wax blocks, the optimized milling tools and machining parameters determined in cooperation with the Institute of Machine Tools and Production Technology (IWF) of TU Braunschweig are presented. In order to evaluate Non-Waste-Wax-Formwork technology in terms of freedom of design and precision, the wax formwork and concrete components produced with different geometric complexity are evaluated by use of a shape and dimension analysis.

The sustainability and economic efficiency is further i.a. shown and evaluated on different realized application examples. In addition, the principle applicability of complex wax displacement bodies (cavity wax formwork) is presented. Finally, perspectives on further research projects at the ITE on the transfer of the technology for industrial applications are given.

**Keywords:** formwork; wax; concrete; resource efficiency; lightweight construction; production technology; freeform, recycling; ultra-high performance concrete; lightweight concrete; precision

*For publications in English regarding the Non-Waste-Wax-Formwork technology, see [1] and [2]*

## Résumé

### Technologie de coffrage en cire sans déchets

Avant de durcir, le béton est de consistance plastique à liquide et possède l'énorme capacité de matérialiser de façon permanente presque tous les coffrages lors de sa solidification. Ce potentiel a été mis à profit, en particulier en période de pénurie de ressources et d'abondance de main-d'œuvre à bas coût au début du XXe siècle, pour réaliser des conceptions filigranes et extrêmement efficaces sur le plan des matériaux en adaptant la géométrie des composants à la direction des forces. Les élégants ponts gaufres et les plafonds en forme de champignon conçus par Maillart rendent ce concept très clair.

Par contre, les systèmes de coffrage actuels optimisent la construction par coffrage d'un autre point de vue : ils sont conçus pour couler rapidement du béton "bon marché" dans des géométries simples en un temps de travail réduit mais ne sont pas adaptés au potentiel de nouveaux matériaux à hautes performances tels que le BFUP (béton fibré à ultra-haute performance). Il en résulte que la fabrication d'éléments en béton à forte intensité de masse consomme plus de ressources (énergie grise/CO<sub>2</sub>) que nécessaire. Grâce au développement de programmes de conception et de calcul numériques, il est maintenant théoriquement possible de réaliser des constructions filigranes et économes en matériaux sous une forme sans précédent. Leur production, par exemple en BFUP, nécessite cependant des coffrages spéciaux complexes, coûteux et produisant beaucoup de déchets, qui ne sont pas économiques. Raison pour laquelle de telles constructions sont rarement réalisées aujourd'hui.

C'est là qu'intervient cette thèse. Grâce au développement d'une technologie de coffrage en cire sans déchets, entièrement recyclable et fabriquée numériquement, l'écart entre la planification numérique et la réalisation économique et écologique pourra être comblé. Cette technologie de coffrage à base de cires industrielles réutilisables à 100 % et formées par usinage CNC par coupe a été développée à cet effet et récompensée en 2017 par le prix de l'innovation des industriels allemands fournisseurs de composants en béton. Rendant possible une mise en forme de haute précision, elle convient non seulement au béton normal, mais aussi plus particulièrement au BFUP à grain fin.

Tout d'abord, on procède à la sélection d'une cire appropriée. A cet effet, les exigences définies pour les coffrages spéciaux sont comparées aux résultats d'analyse déterminés expérimentalement sur 29 cires différentes. Outre le développement d'un processus de production de grands blocs de cire peu sollicités, on présentera également les outils de fraisage optimisés et les paramètres d'usinage déterminés en coopération avec l'Institut de fabrication de machines-outils et de technologies de fabrication (IWF) de l'Université Technique ( TU ) de Braunschweig. Pour évaluer la technologie de coffrage en cire entièrement recyclable en termes de liberté de conception et de précision, on analysera ensuite la forme et la dimension de coffrages et de composants en béton de complexité géométrique diverse déjà réalisés. La durabilité et le rapport coût-efficacité seront ensuite démontrés et évalués sur différents exemples d'applications réalisées. En outre, l'applicabilité de principe à des coffrages complexes en cire (moules à cavité) sera présentée. Enfin, des perspectives seront données pour d'autres projets de recherche à l'ITE sur le transfert de technologie à des applications industrielles.

**Mots-clés:** coffrage; cire; béton; économie de ressources; construction légère; technologie de production; recyclage; béton à ultra-haute performance; béton léger; précision

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) der Technischen Universität Braunschweig. Hier bearbeitete ich ein durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ (DFG KL2119/2-1) gefördertes Forschungsvorhaben mit der Bezeichnung „Non-Waste-Wachsschalungen, Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Betonbauteilen“. Dieses Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) durchgeführt.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Harald Kloft für die vielen Anregungen und Gespräche, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die gewährten Freiheiten zur Fertigstellung dieser Arbeit während meiner Zeit am Institut. Zudem danke ich ihm für die hervorragende Unterstützung bei der Beantragung des dieser Arbeit zugrundeliegenden DFG Forschungsantrages und der beiden das Thema weiterführenden Industriekooperationsforschungsprojekte mit den Bezeichnungen: „Modulares und vollautomatisiertes Fertigungsverfahren für freigeformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen“ (AiF gefördertes ZIM-Projekt) und „Innovative Non-Waste-Wachsschalungen für die Herstellung von hochpräzisen Maschinengestellen aus UHPC“ (DFG gefördertes Erkenntnistransfer-Projekt).

In diesem Zusammenhang danke ich auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung der Vorhaben sowie der Zulieferindustrie Betonbauteile für die Auszeichnung der Non-Waste-Wachsschalung mit dem Innovationspreis 2017.

Herrn Prof. Dr. Klaus Dröder und im Besonderen seinen wissenschaftlichen Mitarbeitern Frau Sarah Baron und Herrn Dr. Hoffmeister danke ich herzlich für die überaus gute und inspirierende Zusammenarbeit im gemeinsamen Forschungsvorhaben.

Herrn Prof. Dr. Harald Budelmann danke ich herzlich für die Anfertigung des Zweitberichtes, die vielen Anregungen und das stete Interesse an meiner Arbeit. Mein Dank gilt auch Prof. Dr. Dirk Lowke für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herrn Prof. Dr. Henning Menzel und seinem Team am Institut für Technische Chemie (ITC) danke ich herzlich für ihre Unterstützung mit (polymer)-chemischer Expertise und für die labortechnische Unterstützung zur Untersuchung und Analyse der Wachse.

Herrn Peter Czajka und seinem Team von der GOM GmbH Braunschweig danke ich herzlich für die Unterstützung mit ihrer optischen 3D-Messtechnik.

Herrn Prof. Dr. Bohumil Kasal und seinem Team am Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) danke ich herzlich für seine Unterstützung bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit der Wachse.

Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Tragwerksentwurf bedanke ich mich für ihre Unterstützung, die kollegiale Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Ein besonderer Dank gilt dabei auch den Kolleginnen und Kollegen, Technikerinnen und Technikern sowie den studentischen Hilfskräften am iBMB, IWF und ITC der Technischen Universität Braunschweig, die mit ihrer tatkräftigen Unterstützung zum Gelingen beigetragen haben. Im Besonderen gilt mein Dank Elena Stein und Karl-Heinz Sprenger für ihre unzähligen Hinweise und Anregungen.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden herzlich für den steten Rückhalt in dieser Zeit danken. Im Besonderen möchte ich meiner Frau Annika und Tochter Emilia für ihre Energie und Geduld sowie meinem Vater Prof. Dr. Georg-Wilhelm Mainka für seine Unterstützung und Motivation zur Promotion danken.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Problemstellung .....	3
1.3 Zielsetzung.....	4
1.4 Vorgehensweise / Inhaltsübersicht .....	5
<b>2 Stand der Technik und Forschung, relevante Patente .....</b>	<b>8</b>
2.1 Entwicklung des Beton-Schalungsbaus.....	8
2.2 Begriffsabgrenzungen, Definitionen und allgemeiner Stand der Technik im Beton-Schalungsbau.....	15
2.2.1 Bestandteile der Beton-Schalung (Schalung).....	15
2.2.2 Anforderung an die Schalung .....	17
2.2.3 Schalungssysteme / Systemschalungen .....	20
2.2.4 Sonderschalungen und geometrieabhängige Kategorisierung .....	23
2.3 Stand der Technik im Sonderschalungsbau für freigeformte Betonbauteile .....	26
2.3.1 Manuell hergestellte Sonderschalungen .....	26
2.3.2 Semi-manuell hergestellte Sonderschalungen .....	27
2.3.3 Vollautomatisiert hergestellte CNC gefräste Sonderschalungen .....	28
2.3.4 Sonderschalungen als Abformung (Matrize) eines bestehenden Modells .....	32
2.4 Stand der Forschung im Sonderschalungsbau für freigeformte Betonbauteile .....	33
2.4.1 Formbare Sonderschalungen .....	33
2.4.1.1 Textile Schalungen (fabric formwork) .....	33
2.4.1.2 CNC gesteuerte adaptive Schalungssysteme .....	34
2.4.1.3 Schalungen auf Basis von Wachsen .....	36
2.4.1.4 Sandschalungen .....	37
2.4.2 Aktiv geführte Schalungen .....	40
2.4.3 Gedruckte Sonderschalungen .....	41
2.4.3.1 Sonderschalungen aus FDM gedrucktem thermoplastischen Kunststoff.....	42
2.4.3.2 Sonderschalungen aus selektiv gebundenen Kunstharz-Sand-Gemischen .....	43
2.4.3.3 Drucken von Wachs.....	44
2.4.3.4 Sonderschalungen aus FDM gedrucktem Wachs - FreeFab .....	45
2.5 Relevante Patente zu Wachsschalungen .....	47
2.5.1 Einleitung Patentrecherche.....	47
2.5.2 Recherchemethode .....	47
2.5.3 D.-Patent 1: DE 000003735806 C1 und Int.-Patent 1: GB 2170752 B .....	48

2.5.4	Int.-Patent 2: PCT/AU2014/000160 .....	50
2.5.5	D.-Patent 2: DE 000019961062 A1 .....	51
2.5.6	D.-Patent 3: DE102007017471 A1 .....	51
2.5.7	D.-Patent 4: DE 102009050487 A1 .....	52
2.5.8	D.-Patent 5: Gebrauchsmuster DE 20 2008 012 108 U1 .....	53
<b>2.6</b>	<b>Zusammenfassung Kapitel 2 und Vorgehensweise im Folgenden.....</b>	<b>54</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen, Analyse und Selektion geeigneter technischer Wachse als Schalungsmaterial .....</b>	<b>56</b>
<b>3.1</b>	<b>Eigenschaften von technischen Wachsen .....</b>	<b>56</b>
3.1.1	Definition und Einteilung von Wachsen .....	56
3.1.2	Chemische Struktur und Gefüge von Wachsen .....	57
3.1.3	Wichtige physikalisch-mechanische Eigenschaften von Wachsen .....	60
3.1.3.1	Aggregatzustände / Einfluss der Kristallinität auf den Wärmeausdehnungs-koeffizienten, die Dichte und Festigkeit.....	60
3.1.3.2	Temperatur- und zeitabhängige physikalisch-mechanische Eigenschaften von Wachsen .....	62
<b>3.2</b>	<b>Relevante Einflussgrößen auf die Wachse als Schalungsmaterial .....</b>	<b>64</b>
3.2.1	Maßgebende Betoneigenschaften.....	64
3.2.2	Maßgebende Krafteinwirkung / Frischbetondruck .....	66
3.2.3	Maßgebende Präzision (Maßabweichungen) .....	66
3.2.4	Ökologische und ökonomische Parameter .....	66
3.2.5	Maßgebendes Formenspektrum und Oberflächengüte .....	67
3.2.6	Anforderungsprofile für Wachse als Schalungsmaterial.....	68
<b>3.3</b>	<b>Analyse und Selektion geeigneter Wachse als Schalungsmaterial.....</b>	<b>70</b>
3.3.1	Auswahl der potentiell geeigneten Wachse.....	70
3.3.2	Vorauswahl der Wachse hinsichtlich ihrer Zerspanbarkeit (Fräsbarkeit) .....	71
3.3.3	Ermittlung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Wachse .....	74
3.3.3.1	DSC: dynamische Differenzkalorimetrie .....	74
3.3.3.2	Wärmeleitfähigkeit .....	78
3.3.3.3	Rohdichte und thermische volumenspezifische Ausdehnung .....	79
3.3.3.4	Biegezugfestigkeit.....	81
3.3.3.5	Zylinderdruckfestigkeit .....	84
3.3.4	Weiterführende Untersuchungen an selektierten Wachsen .....	88
3.3.4.1	Prismendruckfestigkeit, Einfluss von Temperatur und Füllstoffen.....	88
3.3.4.2	Zeitstandverhalten / Kriechen und Einfluss von Füllstoffen .....	92
3.3.4.3	Zugfestigkeit .....	94
3.3.4.4	Dynamisch-mechanische thermische Analyse (DMTA) .....	95

3.4	<b>Zusammenfassung der Grundlagen, Analyse und Begründung der Selektion geeigneter technischer Wachse .....</b>	<b>97</b>
<b>4</b>	<b>Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie .....</b>	<b>99</b>
4.1	<b>Prozessrelevante Begleituntersuchungen und Versuche .....</b>	<b>99</b>
4.1.1	Herstellung großformatiger spannungsarmer Wachsböcke .....	99
4.1.1.1	Direktes Gießen von heißem flüssigen Wachs .....	99
4.1.1.2	Tempern und plastisches Umformen des Wachses.....	101
4.1.1.3	Lagenweises Gießen von Wachs .....	102
4.1.1.4	Wachsinjektion.....	102
4.1.1.5	Verguss von bereits erkalteten Wachstafeln.....	103
4.1.1.6	Pressen von Wachsspänen .....	108
4.1.2	Schalungstechnische Randbedingungen .....	110
4.1.2.1	Verbindungs- und Verankerungsmittel im Wachs.....	110
4.1.2.2	Ausschalhilfen zur Trennung von Wachsschalung und Betonbauteil .....	110
4.2	<b>Einfluss der Wachsspezifikationen auf die Zerspanbarkeit .....</b>	<b>113</b>
4.2.1	Planfräsen.....	114
4.2.2	Schaftfräsen.....	115
4.2.3	Freiformfräsen.....	116
4.2.4	Fazit der Grundlagenuntersuchungen für die Herstellung von Wachsschalungen .....	119
4.3	<b>Außen-Wachsschalungen .....</b>	<b>121</b>
4.3.1	Entwurf von Referenzgeometrien (Formenbausteine) .....	121
4.3.2	Herstellung der Referenz-Wachsschalungselemente durch subtraktive Bearbeitung (Fräsen) .....	123
4.3.3	Herstellung der Referenzprobekörper .....	124
4.3.4	Überprüfen der Maßhaltigkeit der gefrästen Schalungselemente und erstellten Betonkörper mithilfe optischer 3D-Messtechnik .....	126
4.3.4.1	Form- und Maßanalyse der Wachsschalungen vor dem Abguss mit UHPC.....	126
4.3.4.2	Form- und Maßanalyse der Wachsschalungen vor und nach dem Abguss mit UHPC ....	128
4.3.4.3	Form- und Maßanalyse der UHPC-Abgüsse .....	128
4.4	<b>Ökonomische und ökologische Aspekte.....</b>	<b>130</b>
4.4.1	Materialkosten des CFW Wachses.....	130
4.4.2	Wiederverwendung / Recycling von Wachs .....	131
4.4.3	Toxikologie und Sicherheit des CFW Wachses.....	132
4.5	<b>Anwendungsbeispiele für die Wachsschalungen .....</b>	<b>133</b>
4.5.1	Herstellung eines Beton-Fertigteilkons .....	133
4.5.2	Herstellung eines Schacht-Unterteils für Abwasserleitungen.....	137
4.5.3	Herstellung des UNI-CON <sup>2</sup> Demonstrators (Stützenkopfschalung) .....	138



<b>4.6</b>	<b>Hohlraum-Wachsschalungen.....</b>	<b>140</b>
4.6.1	Hohlraum-Wachsschalungen als Ergänzung zu den Außen-Wachsschalungen	140
4.6.2	Bestehende Hohlraum-Schalungstechniken .....	140
4.6.3	Potential von Hohlraum-Wachsschalungen.....	141
4.6.4	Bestimmung der Mindestprozessparameter .....	141
4.6.5	Ausschmelzen der Verdrängungskörper aus Wachs .....	143
4.6.6	Fazit Hohlraum-Wachsschalungen.....	145
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung, Ausblick und Potential.....</b>	<b>146</b>
5.1	Zusammenfassung .....	146
5.2	Ausblick und Potential für weiterführende Entwicklungen .....	149
<b>6</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>151</b>
6.1	Literaturverzeichnis .....	151
6.2	Tabellenverzeichnis .....	159
6.3	Abbildungsverzeichnis .....	160
<b>7</b>	<b>Werdegang .....</b>	<b>168</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>169</b>

Anhang A: Liste der geprüften Patente

Anhang B: Technische Datenblätter der Wachse

Anhang C: Überprüfung der Fräsbarkeit von unterschiedlichen Wachsen

Anhang D: Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) von Wachsen

Anhang E: Rohdichte und thermische volumenspezifische Ausdehnung von Wachsen

Anhang F: Biegezugversuche Wachse

Anhang G: Auszugsversuche Verbindungs- und Verankerungsmittel im Wachs

Anhang H: Formenbausteinkatalog

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

### Abkürzungen:

BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design (rechnergestütztes Konstruieren und Zeichnen)
CAE	Computer Aided Engineering (rechnergestützte Entwicklung und Berechnungen)
calc	berechneter Wert
CAM	Computer Aided Manufacturing (rechnergestützte Steuerung und Überwachung von Produktionsabläufen)
CFW	ConFormWax (Concrete Formwork Wax)
CNC	Computerized Numerical Control (rechnergestützte numerische Steuerung)
DBFL	Building Fabrication Laboratory Großgerät des ITE
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGF	Deutsche Gesellschaft für Fett
DSC	dynamische Differenzkalorimetrie
EPS	Expandiertes Polystyrol
exp	experimenteller Wert
FRC	faserverstärkter Beton (fibre reinforced concrete)
GOM	Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH, Braunschweig
iBMb	Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig
ILC	Infra-Leichtbeton (infra light concrete)
ITC	Institut für Technische Chemie der Technischen Universität Braunschweig
ITE	Institut für Tragwerksentwurf der Technischen Universität Braunschweig
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig
NWW	Non-Waste-Wachsschalungen
PU	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
SC3DP	Shotcrete 3D Printing
SPP	Schwerpunktprogramm der DFG
UHPC	Ultrahochfester Beton (ultrahigh performance concrete)
UHPFRC	Ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton (ultra-high performance fibre reinforced concrete)
WDM	Wachs Extrusions Drucken (engl. Wax Deposition Modeling)
WKI	Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut
WLF	Wärmeleitfähigkeit
XPS	Extrudierter Polystyrol-Hartschaum

### Lateinische Buchstaben:

$\Delta Q$	übertragene Wärmemenge
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$\Delta t$	Zeitdifferenz
$a_e$	Eingriff
$a_p$	Zustellung
$B$	Breite bzw. Seitenlänge z. B. des Querschnitts eines Prismas
$C_p$	Wärmekapazität bei konstantem Druck
$d / \varnothing$	Durchmesser
$E_{kSchm}$	Schmelzenergiekosten
$E_P$	Erstarrungspunkt (Entspricht etwa $T_K$ )

$E_{Ph}$	Energie für die Phasenumwandlung (fest / flüssig)
$E_{Schm}$	Schmelzenergie
$E_W$	Energie zum Erwärmen
$F_B$	aufgebrachte Bruchlast
$f_z$	Vorschub je Schneide
$H$	Höhe z. B. des Querschnitts eines Prismas
$L$	Länge bzw. Abstand z. B. zwischen zwei Auflagern
$n$	Drehzahl
$N$	Probenumfang / Probenanzahl
$Q$	Zeitspanvolumen
$s$	Standardabweichung
$s_{max}$	gemittelte maximale absolute Durchbiegung (Biegezug)
$T$	Temperatur
$t$	Zeit
$T_G$	Glasübergangstemperatur (auch Erweichungstemperatur oder –bereich, EB genannt)
$T_K$	Kristallisationstemperatur
$T_P$	Tropfpunkt (Entspricht etwa $T_S$ )
$T_S$	Schmelztemperatur / Schmelzpunkt
$T_Z$	Zersetzungstemperatur
$v$	Geschwindigkeit
$v_c$	Schnittgeschwindigkeit
$v_f$	Vorschubgeschwindigkeit
$WAX_{inv}$	Materialinvestitionskosten des Wachses
$WAX_{jE}$	Materialkosten des Wachses je Einsatz
$WAX_{wvr}$	Wiederverwendungsrate des Wachses

#### Griechische Buchstaben:

$\epsilon_{el,0}$	spontane elastische Dehnung
$\epsilon_v$	verzögert elastische Dehnung
$\epsilon_f$	plastische Dehnung
$\epsilon_k$	Kriechdehnung (Summe aus $\epsilon_v$ und $\epsilon_f$ )
$\alpha$	thermischer Längenausdehnungskoeffizient
$\gamma$	thermischer Raumausdehnungskoeffizient / Volumenausdehnungskoeffizient
$\Delta\epsilon_{f,max}$	Biegedehnung bei Erreichen der Bruchlast
$\Delta\sigma_{f,max}$	max. Biegespannung Randfaser (Biegezugfestigkeit)
$\sigma_{hk,max}$	maximaler auf die Schalung wirkender charakteristischer Frischbetondruck
$\sigma_{hd,max}$	maximaler auf die Schalung wirkender Frischbetondruck
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\epsilon_{cy}$	Fließstauchung
$\sigma_x$	Druckspannung der Wachse bei deutlicher Verringerung der Tangentensteigung
$\sigma_y$	Druckfließspannung (Anstieg der Stauchung ohne Anstieg der Spannung)

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Während in der industriellen Fertigung die aktuellen Diskussionen um die zukünftigen Entwicklungen von den Themen „Industrie 4.0“, das heißt die Vernetzung der Produktionstechniken und -prozesse zu einer sogenannten „Smart Factory“, sowie der „Mensch-Roboter-Kooperation“ bestimmt werden, scheint das Bauwesen noch nicht einmal in einer ressourceneffizienten Produktion der Industrie 3.0 angekommen zu sein. Die digitale Revolution mit ihrer Vielzahl an neuen Möglichkeiten hat zwar, wie bereits 2001 durch Kloft in [3] beschrieben, Einzug in den Bauplanungsbüros in Form leistungsfähiger Entwurfs-, Berechnungs-, Konstruktions- und Simulationsprogramme gehalten, auf der Baustelle werden jedoch immer noch über das notwendige Maß hinaus hochwertige Werkstoffe und industriell hergestellte Halbzeuge verbraucht und auch heute noch „Stein-auf-Stein“ gesetzt oder „Naht-für-Naht“ zusammengeschweißt.

In der Vergangenheit entwarfen und bauten Architekten und Ingenieure wie Candela und Calatrava auch ohne digitale Technik herausragende Schalenbauten, elegant gevoutete Brücken, Pilzdecken Maillart'scher Prägung oder organische Bauten im Betonbau. Heute scheint sich dagegen die Diskrepanz zwischen dem, was in der digitalen Planungswelt an Komplexität handhabbar ist, und dem, was in der realen Welt baulich umgesetzt wird, stetig zu vergrößern.

Wie in dem Fachartikel *Wirtschaftliches Konstruieren und Bewehren* [4] beschrieben, ist es mit den heutigen digitalen Berechnungsprogrammen möglich, die Masse eines Betonbauteils bei nahezu gleicher Tragfähigkeit deutlich zu verringern, z. B. durch Anwendung einer topologischen Optimierung der Form (Strukturoptimierung). In Abbildung 1-1 wird am Beispiel eines einfachen Stahlbetonbalkens mit Rechteckquerschnitt deutlich, dass sich theoretisch über eine Strukturoptimierung das Gewicht um 70 % reduzieren lässt, bei Verwendung optimierter Betone wie ultrahochfestem Beton (UHPC) und einer erhöhten Präzision sogar um bis zu 95 %. Ähnliches, die Verwendung optimierter Betone betreffend, wurde bereits im Sachstandsbericht UHPC [5] beschrieben und erfolgreich realisiert.

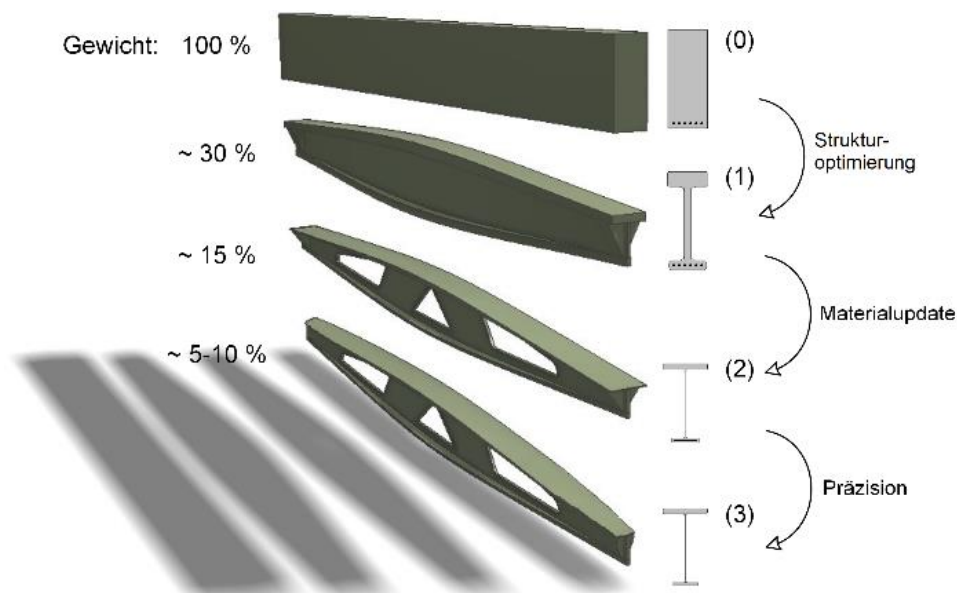


Abbildung 1-1: Optimierungspotential von Betonbauteilen am Beispiel eines Einfeldträgers aus Beton bei gleicher Tragfähigkeit [4]

Zwei Beispiele, die aus architektonischer und ingenieurtechnischer Sicht herausragende „Leuchtturm-Projekte“ sind, sind das MuCEM in Marseille (Abbildung 1-2) und die Wildbrücke in Kärnten [6]. Sie zeigen eindrucksvoll, dass sich mit digitaler Berechnung, Optimierung und dem Einsatz moderner Baustoffe nicht nur effiziente, sondern auch ästhetisch anspruchsvolle Bauwerke errichten lassen.

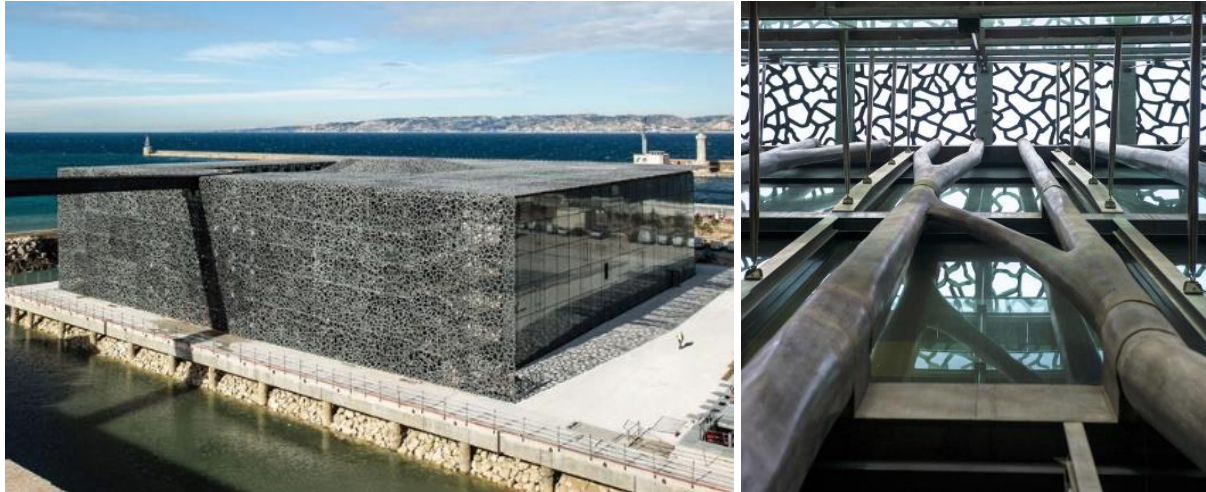


Abbildung 1-2: Museum der Zivilisationen Europas und des Mittelmeers (MuCEM) in Marseille: Außenansicht der vorgehängten Fassade bestehend aus 384 UHPC-Paneelen (links), tragende freigeformte Baumstützen aus vorgespanntem UHPC (rechts)

Leider sind solche Konstruktionen vornehmlich Prestigebauten vorbehalten und stellen in der gesamten Baumasse eher eine Seltenheit dar. Hier dominiert eindeutig die konventionelle massenintensive Planung und Herstellung von Betonbauwerken. Es ist festzustellen, dass in der Bauwirtschaft trotz der digitalen Möglichkeiten eine Rationalisierung durch Vereinfachung der Geometrien hin zu orthogonal-planar geformten Bauteilen stattgefunden hat [7]. Diese wird vornehmlich durch hohe Lohnkosten im Vergleich zu den Materialkosten getrieben. Der Herstellungsaufwand dieser vereinfachten Geometrien sinkt zwar rein monetär gesehen, führt im Gegenzug aber zu einem höheren Materialeinsatz und somit in Bauwerken zu statisch nicht notwendiger „toter“ Betonmasse.

In der Bauwirtschaft kann daher, bei einer ganzheitlicheren Betrachtung, in den letzten Jahren von einer rückwärtsgewandten Entwicklung gesprochen werden, weg von effizienten Formen und einem effizienten Einsatz von Beton. Die Reduktion von Masse, von grauer Energie (gebundener Energie) und die damit einhergehende Reduktion des Zementverbrauchs und des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes sollte hingegen das Ziel für die dringend notwendige Begrenzung der Klimaerwärmung sein.

Der Gang „vom plumpen Betonbau der Vergangenheit zur Filigranität und Leichtigkeit des Betonbaus der Zukunft“ [8] und die Erforschung eines neuen Betonleichtbaus nach dem Prinzip „form follows force“ [8] ist das Ziel des DFG-Schwerpunktprogramms (SPP) 1542 „Leicht Bauen mit Beton“. Dies beinhaltet eine deutliche Reduktion des Eigengewichts von Bauteilen und die damit verbundene signifikante Einsparung von natürlichen Ressourcen, im Besonderen des Zementes. Im Rahmen dieses Schwerpunktprogramms ist auch das dieser Arbeit zugrundeliegende Forschungsprojekt „Non-Waste-Wachsschalungen“ entstanden und durchgeführt worden.

In den weiteren Teilprojekten konnten im Rahmen des SPP 1542 an der Technischen Universität Braunschweig neue Anwendungsgebiete für ästhetische, leichte und somit effiziente Konstruktionen aus UHPC für eine ressourceneffizientere Bauwirtschaft aufgezeigt werden. In Zusammenarbeit mit dem iBMB bzw. Prof. Budelmann wurden am ITE von 2011 bis 2017 u. a. die folgenden Projekte durchgeführt: „Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkselemente aus UHPC“ und „Von der Bauteilfügung zu leichten Tragwerken: Hybride, trocken gefügte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC“. Hierbei wurden neuartige Fügetechniken und eine gesteigerte Performance der UHPC Bauteile durch das Zusammenwirken von äußerer Form und innerer Struktur erforscht.

## 1.2 Problemstellung

Trotz der intensiven Forschungen, der Verfügbarkeit von leistungsstarken digitalen Entwurfs-, Berechnungs- und Optimierungsprogrammen sowie neuartigen Betonen wie UHPC mit seiner plastischen, nahezu unbegrenzten Formbarkeit bei gleichzeitig hoher Festigkeit, werden leichte und ressourceneffiziente Konstruktionen höchstens bei Großprojekten des Ingenieurbaus und bei Kulturbauten angewendet und weniger bei alltäglichen Bauwerken in der Baupraxis. Ein Grund dafür ist sicher die noch fehlende Regelung durch Normen. Ein weiterer wesentlicher Grund, welcher sich auch bei anfänglichen Forschungen am ITE im Rahmen des SPP 1542 herausstellte, ist, dass die Bauwirtschaft auf die effiziente Herstellung von strukturoptimierten, geometrisch komplexen Betonbauteilen noch nicht vorbereitet ist.

Die marktgängigen geraden, ebenen und in den vergangenen Jahren immer weiter mechanisierten und standardisierten Systemschalungen (wie z. B. Rahmen- und Trägerschalungen) für Decken, Stützen, Platten und Scheiben sind für die Herstellung präziser strukturoptimierter Bauteile nicht geeignet. Außerdem werden sie auch den Potentialen der neuen Baustoffe wie (ultra-)hochfesten Betonen (UHPC) mit enormer Drucktragfähigkeit und Steifigkeit [5], (Infra-)Leichtbetonen (ILC) mit einem verringerten Eigengewicht bei gleicher Festigkeit [9], [10] und sehr dauerhaften, duktilen Faserbetonen (FRC) [11] nicht gerecht. Die Herstellung von präzisen freigeformten Bauteilen aus UHPC, z. B. die freigeformten Baumstützen aus vorgespanntem UHPC des MuCEM, ist zwar heute ohne weiteres technisch möglich, erfordert aber aufwendige und teure Sonderschalungen mit vielfältigen Nachteilen. Bei wechselnden Geometrien können diese Sonderschalungen kaum wiederverwendet werden und das Schalungsmaterial, z. B. bei Polyurethan- oder Polystyrol-Schalungen, kann aufgrund seiner Beschichtung oft nicht recycelt bzw. muss als Sondermüll entsorgt werden. Des Weiteren sind die auftretenden Toleranzabweichungen der meisten Sonderschalungen für die Herstellung von Präzisionsfertigteilen meist inakzeptabel.

Diese Nachteile begründen auch, warum die Sonderschalungskosten zur Herstellung von präzisen freigeformten Betonbauteilen, gemessen an den gesamten Betonbaukosten, bis zu 60 % betragen können [12], wohingegen die Schalungskosten für ebene standardisierte Systemschalungen nur etwa 25 % der Betonbaukosten entsprechen [13].

Durch den Bau von leichten und strukturoptimierten Betonkonstruktionen könnte nicht nur graue Energie, sondern auch erhebliche Materialkosten eingespart werden. Aber obwohl Bauherren, Architekten und Ingenieure heute die technischen Voraussetzungen für die Planung dieser Bauten besitzen, wird bei der Betrachtung der Gesamt- bzw. Schalungskosten für die Herstellung im Vergleich zu den reinen Materialkosten des Betons schnell deutlich, weswegen aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten, bis auf vereinzelte Prestige-Bauwerke, vornehmlich orthogonal-planare Betonkonstruktionen mit mehr Beton als statisch notwendig in der Bauwirtschaft gebaut werden. Die Tatsache, dass heutige Sonderschalungen meistens „Einwegschalungen“ sind und nach nur einer Verwendung entsorgt werden müssen, verstärkt diesen Effekt noch weiter und macht die durch eine mögliche Betoneinsparung erzielten ökologischen Vorteile wieder zunichte.

Um diesem entgegenzuwirken und die mit den heutigen digitalen Werkzeugen mögliche strukturelle Effizienz im Betonbau auch unter wirtschaftlichen Aspekten gewährleisten zu können, benötigt die Bauwirtschaft eine möglichst wirtschaftliche und ökologisch nachhaltige Schalungstechnologie für Sonderschalungen, mit welcher freigeformte Betonbauteile jeglicher Art und in hoher Präzision hergestellt werden können.

### 1.3 Zielsetzung

Diese Arbeit wurde durch die Forschung von Gramazio/Kohler [2] an der ETH Zürich inspiriert und basiert auf den Forschungsergebnissen des am ITE in Kooperation mit dem IWF durchgeführten gleichnamigen Forschungsprojektes im DFG Schwerpunktprogramm 1542 sowie weiterführenden Untersuchungen.

Das übergeordnete Primärziel der vorliegenden Arbeit ist die grundlegende Entwicklung und Beschreibung einer neuartigen allgemeingültigen Schalungstechnologie für Sonderschalungen mit der Bezeichnung „Non-Waste-Wachsschalungstechnologie“. Diese Präzisions-Schalungen aus nahezu 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen dienen der Herstellung von geometrisch komplexen Betonbauteilen in Kleinserie oder als Unikat. Neben dem Hauptanwendungsgebiet als Außenschalung soll die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie auch auf die Herstellung von komplexen Verdrängungskörpern anwendbar sein.

Die Beschreibung der erzielten grundlegenden Forschungsergebnisse soll es Dritten ermöglichen, die Technologie einfach anwenden zu können, und zudem eine Basis für weiterführende Entwicklungen der Technologie, schaffen, damit z. B. durch eine vollautomatisierte Herstellung von Wachsschalungen in Modulbauweise die Wirtschaftlichkeit und somit Akzeptanz weiter gesteigert werden kann.

In Abbildung 1-3 werden anhand der schematischen Darstellung der grundsätzliche Prozess und die Prozessschritte (PS) zur Herstellung von Wachsschalungen und der Wiederverwendung des Waxes aufgezeigt.

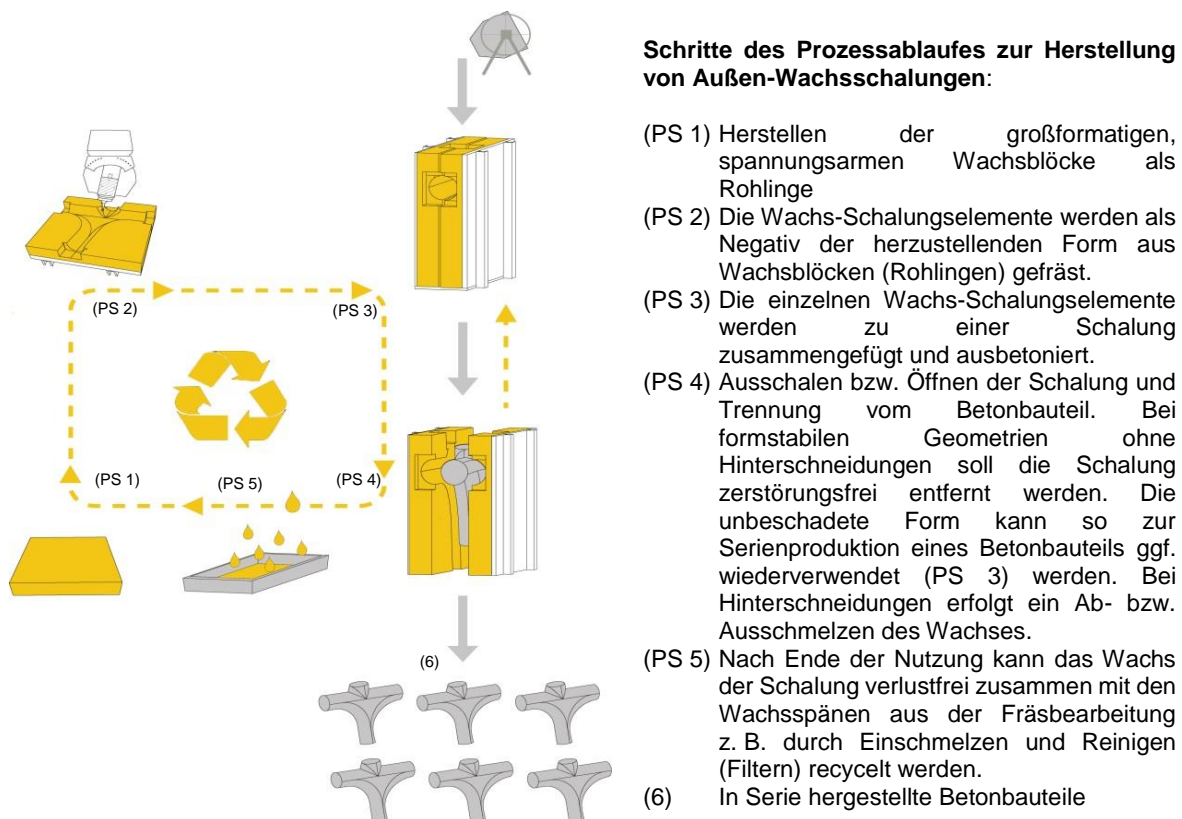


Abbildung 1-3: Prinzip des Prozessablaufes zur Herstellung von Wachsschalungen für Betonbauteile aus formstabilen (serienfähigen) Geometrien mithilfe gefräster Wachsschalungen (gelb) am Beispiel eines organisch geformten Knotenelements für UHPC Stabwerke; bei Betonbauteilen aus formzerstörenden Geometrien besteht alternativ die Möglichkeit, das Betonbauteil thermisch durch Abschmelzen auszuschalieren.



An die Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie wurden folgende grundlegende Anforderungen gestellt:

- **Ökologisch bzw. nachhaltig** durch gänzliche Vermeidung von Abfällen und Einhaltung eines geschlossenen Schalungsmaterialkreislaufes („Closed Loop Recycling“ – einfache Wiederverwendbarkeit des Schalungsmaterials und der Produktionsabfälle)
- **Formfreiheit** zur Herstellung geometrisch komplexer Beton-Bauteile – insbesondere aus UHPC, aber auch aus Normalbetonen bis hin zu Leichtbetonen – mit einstellbaren Oberflächenqualitäten, scharfen Kanten, sehr kleinen Krümmungsradien und Hinterschneidungen
- **Präzision** durch Einhaltung niedriger Toleranzen zur Erzeugung von präzisen Schalungen für ebenso präzise Betonbauteile unter Beachtung der temperaturbedingten Formänderungen
- **Ökonomisch** sinnvoller als die bestehenden Sonderschalungstechniken

Im Gegensatz zu den bestehenden Schalungstechnologien für Sonderschalungen (vergl. 2.3), die meist nur eine der Anforderung erfüllen, soll für eine spätere erfolgreiche Anwendung in der Bauindustrie die zu erforschende Non-Waste-Wachsschalungstechnologie alle vier Anforderungen bestmöglich erfüllen.

#### 1.4 Vorgehensweise / Inhaltsübersicht

Das Erreichen des Primärziels unter Beachtung der Prozessschritte und der gestellten Anforderungen erfordert mehrere aufeinander abgestimmte Entwicklungsschritte bzw. die Erforschung und Verifizierung unterschiedlicher Teilaspekte. Basierend auf diesen Entwicklungsschritten ist die vorliegende Arbeit inhaltlich in 5 Kapitel gegliedert (siehe Abbildung 1-4: Strukturdiagramm dieser Arbeit). Die wesentlichen Schritte des Entwicklungsprozesses sowie die experimentellen Untersuchungen zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie sind nachfolgend inhaltlich zusammengefasst aufgeführt:

In **Kapitel 2** wird die historische Entwicklung des Schalungsbaus hin zur heutigen Schalungstechnik für komplexe freigeformte Geometrien dargestellt. Der allgemeine (System-)Beton-Schalungsbau wird hinsichtlich des Stands der Technik erläutert und es werden relevante Begriffsabgrenzungen vorgenommen. Für den Sonderschalungsbau (Freiformschalungen) wird der Stand der Technik und Forschung dargestellt und hinsichtlich der jeweiligen Vor- und Nachteile analysiert. Am Ende des Kapitels werden die ermittelten relevanten Patente mit Bezug zu Wachsschalungen dargestellt und diskutiert.

**Kapitel 3** gibt einen Überblick u. a. zu relevanten Eigenschaften von Wachsen, wie Arten, chemische Strukturen und Gefüge, Aggregatzustände, Kristallinität sowie temperatur- und zeitabhängiges physikalisch-mechanisches Verhalten. Aus den aufgestellten Anforderungen an Sonderschalungen wird ein detailliertes Anforderungsprofil mit relevanten Einflussgrößen auf Wachse als Schalungsmaterial abgeleitet. Im Hinblick auf das Anforderungsprofil werden die 29 als prinzipiell geeignet angesehenen Wachse mittels Versuchen zur Zerspanbarkeit (Fräsbarkeit) und zur Ermittlung der relevanten physikalisch-mechanischen Eigenschaften analysiert: Differenzkalorimetrie (DSC, Messung der aufgenommenen Wärmemenge), Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte, thermische volumenspezifische Ausdehnung, Biege- und Druckfestigkeit.

Als Ergebnis der Analyse werden zwei Wachse empfohlen, die für die Anwendung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie als geeignet angesehen werden. Abschließend werden für diese beiden Wachse die zusätzlich durchgeführten Analysen dargestellt. Diese beziehen sich auf die Druckfestigkeitssteigerung durch Füllstoffe, die Zeitstandfestigkeit und Kriechen, die Zugfestigkeit sowie die dynamisch-mechanische Analyse (DMA: Änderung des E-Moduls über die Temperatur).

**Kapitel 4** stellt die einzelnen Entwicklungsschritte der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie dar und ist in die folgenden 6 Abschnitte untergliedert:

**Die Begleituntersuchungen** (Kapitel 4.1) zur Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung großformatiger spannungsarmer Wachsböcke und Integration von Ausschalhilfen sowie die Auswahl und Verifizierung geeigneter Verbindungs- bzw. Verankerungsmittel.

**Die Grundlagenuntersuchung zum Einfluss der Wachsspezifikationen auf die Zerspanbarkeit** (Kapitel 4.2) stellt die Auswertung der in Kooperation mit dem IWF durchgeführten Analysen zum Einfluss der Wachsspezifikationen auf die Zerspanbarkeit beim Plan-, Schaft- und Freiformfräsen in Bezug zur erzielten Qualität der Schalungsoberfläche (Rauigkeiten) dar. Zudem wird Aufschluss über geeignete Frässtrategien, die Auswahl optimaler Werkzeuge, Schneidstoffe, Kühlschmierbedingungen (trocken, Druckluft, polymere Lösung) und Prozessparameter (wie Eingriff, Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit) gegeben.

Die gesammelten Erkenntnisse werden auf die **Fertigung von geometrisch komplexen großformatigen Außen-Wachsschalungen** (Kapitel 4.3) übertragen und anhand von drei als Referenz dienenden Wachsschaltafeln verifiziert und bewertet. Die Wachsschaltafeln bestehen aus einer Auswahl repräsentativer geometrischer Formen der Architektur, sogenannten Formenbausteinen, anhand derer die geometrischen Möglichkeiten und Restriktionen in der Fertigung der Schalungen und der damit hergestellten Betonkörper aufgezeigt werden. Auf Basis der durchgeführten digitalen Form- und Maßanalysen wird abschließend eine Aussage über die Herstellungstoleranz bzw. erreichte Präzision in Abhängigkeit der jeweiligen geometrischen Form getroffen.

Anhand der **ökologischen und ökonomischen** (Kapitel 4.5) Aspekte wird gezeigt, dass sich Wachsschalungen wirtschaftlich einsetzen lassen und ein Entstehen von Produktionsabfällen komplett vermieden werden kann.

Die drei dargestellten **Anwendungsbeispiele für die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie** (Kapitel 4.5) zeigen die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten im Bauwesen und geben Empfehlungen für die Anwendung in der Baupraxis.

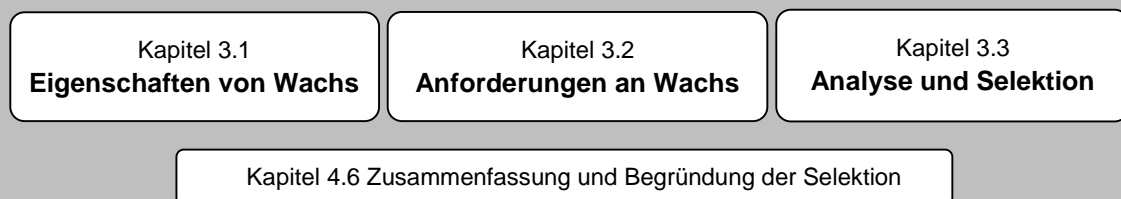
Als Ergänzung zu den Außen-Wachsschalungen zeigen die Untersuchungen zu **Hohlraum-Wachsschalungen** (Kapitel 4.6) die Möglichkeiten und Restriktionen für die Anwendung von geometrisch komplexen Verdrängungskörpern aus Wachs, welche den Beton verdrängen und nach dem Herausschmelzen des Wachses im Inneren eines Betonbauteils gezielt Hohlräume erzeugen können.

Im letzten **Kapitel 5** werden die erzielten Ergebnisse zusammengefasst, Ausblicke gegeben, wie in weiterführenden Forschungsprojekten die Wachsschalungstechnologie in industrielle Anwendungen überführt werden soll, und es werden Empfehlungen zu weiterem Forschungsbedarf gegeben.

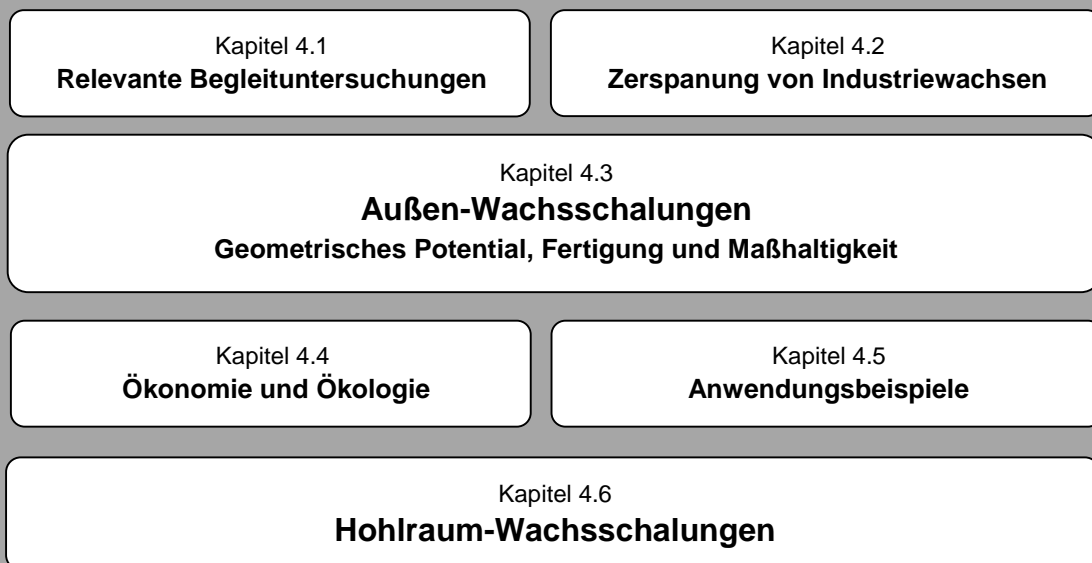
## I. & II. Einführung, Stand der Technik und Forschung, Patente



## III. Selektive Analyse geeigneter Wachse



## IV. Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie



## V. Schlussbemerkung

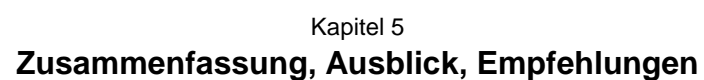


Abbildung 1-4: Strukturdiagramm dieser Arbeit

## 2 Stand der Technik und Forschung, relevante Patente

### 2.1 Entwicklung des Beton-Schalungsbaus

Der Ursprung der Beton-Schalung, im Folgenden auch Schalung genannt, lässt sich auf die ersten Verwendungen formbarer Baustoffe und dabei vor allem von Lehm zurückführen. So wurden ca. 8.000 v. Chr. erste Lehmhäuser im heutigen Anatolien in der Türkei errichtet, welche aus rechteckig geformten luftgetrockneten Lehmsteinen bestanden, für deren Herstellung wahrscheinlich primitive Schalungswerkzeuge Anwendung fanden. Abbildung 1-1, links zeigt, wie Lehmsteine mit solchen primitiven Schalungswerkzeugen später in Ägypten um 1.500 v. Chr. hergestellt wurden. [14]

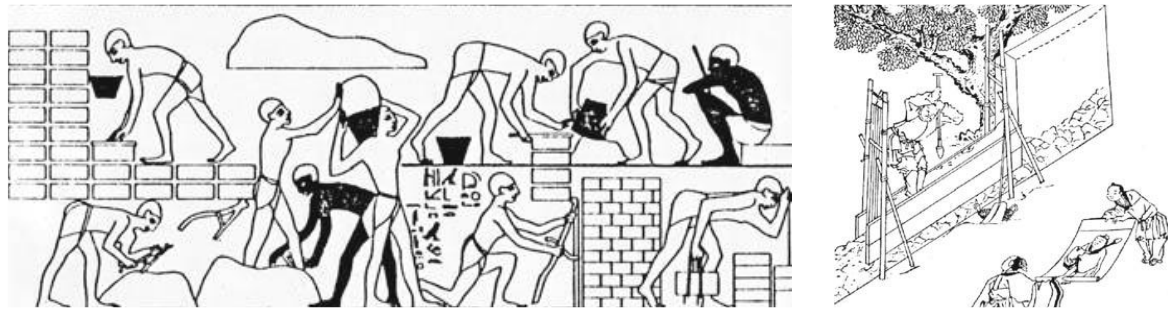


Abbildung 2-1: Herstellung von Lehmsteinen im alten Ägypten, ca. 1500 v. Chr.; Darstellung im Grabmal des Großwesirs Rechmire, Theben-West [14] (links), historische Darstellung der Stampflehm-Bauweise im alten China, Shang-Dynastie ca. 1320 v. Chr. [15] (rechts)

Erste Wandschalungen für Stampflehmbauten (Abbildung 2-1, rechts), welche alle Grundelemente von heutigen Beton-Wandschalungen wie Holzbohlen (Schalhaut) auf hölzernen Trägern (Schalungsträger), Stützböcke (Traggerüst) und sogar Verbindungen beider Schalseiten (Schalungsanker) aufweisen, lassen sich bereits in der Shang-Dynastie (um 1320 v. Chr.) im alten China finden. Mit dem Aufkommen eines neuen formbaren Baustoffes, dem sogenannten „Römischen Beton“ oder „Opus Caementitium“, welcher aus Kalkmörtel „Caementum“ und mineralischem Zuschlag (vornehmlich Travertin, Tuff, Ziegel und Bims in Form von Brocken und Splitt) hergestellt wurde und im Wesentlichen auf griechischen und phönizischen Erkenntnissen beruht, entstand vermutlich durch Übertragung der Schalungstechniken aus dem Lehmhausbau der eigentliche Beton-Schalungsbau. Die Römer nutzten dabei als Beton-Schalung entweder das aus Griechenland stammende Verfahren des Gussmauerwerks mit ausbetonierten und zweischalig gemauerten Steinwänden (verlorene Schalung) oder Holzbretter und -balken in Analogie zum Stampflehmhausbau, welche nach dem Erhitzen wieder entfernt und erneut verwendet werden konnten [16]. Die Abmessungen der durch die Römer aus reinem „Opus Caementitium“ mit Hilfe von hölzernen Schalungen errichteten Bauwerke und besonders deren Gewölbespannweiten nahmen dabei konsequent zu. Wurden hiermit zuerst nur kleinere Aquädukte überdacht, zeigt beispielhaft die Kuppel des wieder aufgebauten Pantheons in Rom (Abbildung 2-2, links; ca. 115–126 n. Chr., Spannweite 43,3 m) die durch die Römer entwickelte Leistungsfähigkeit des frühen Römer-Betons und des hierfür wahrscheinlich verwendeten hölzernen Schalungsbaus.

Mit dem Untergang des Römischen Reiches geriet auch die frühe Betonbauweise in Vergessenheit, sodass im Mittelalter hauptsächlich die Fachwerkbauweise mit Holz, Lehm und Stroh sowie gehauenen Naturstein für größere Bauwerke wie Burgen und Kirchen zum Einsatz kam. Erst ab Mitte des 18. Jahrhunderts fand der „Beton“ als Gemisch von wasserbeständigem Mörtel und Zuschlägen, wie er durch den Franzosen Bernard Forster de Bélidor 1753 erstmals schriftlich benannt wurde, wieder Einzug in das Bauwesen. Der Siegeszug des modernen Betonbaues zum Massenbaustoff der Neuzeit wurde dabei maßgeblich durch die Erfindungen des Portlandzementes durch den Engländer Joseph Aspdin (Patent von 1824: An Improvement in the Mode of Producing an Artificial Stone) und die Erfindung des Stahlbetons durch Joseph Monier (Patent von 1867: „Système de caisses-bassins mobiles en fer et ciment applicables à l'horticulture“<sup>1</sup>) ermöglicht [17].

<sup>1</sup> System mobiler Behälterkästen aus Eisen und Zement für den Gartenbau

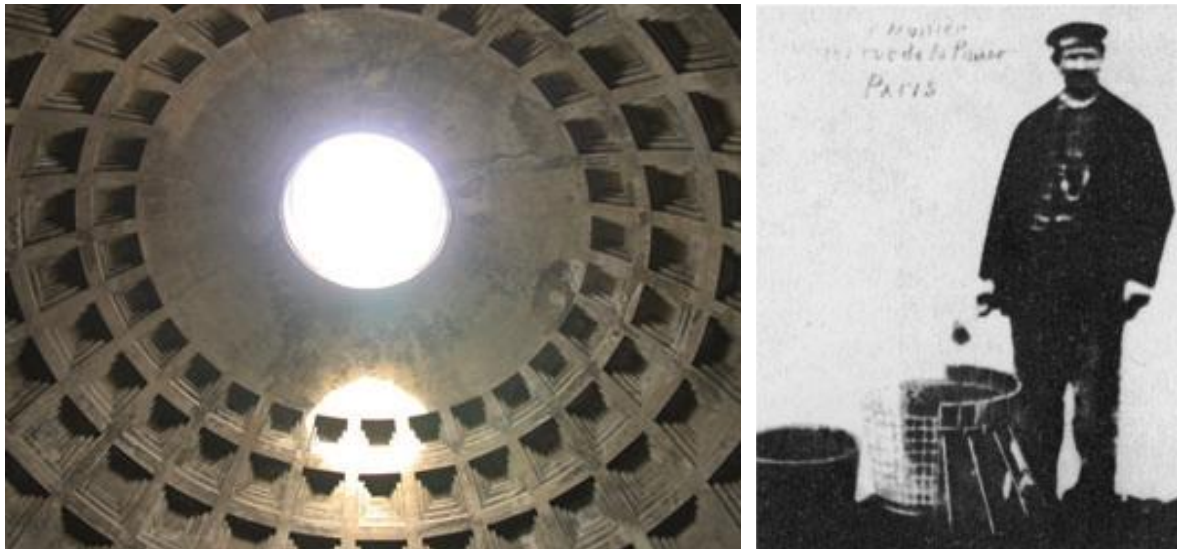


Abbildung 2-2: Kuppel des Pantheons in Rom Foto H. Kloft (links), Joseph Monier neben Schalung für Blumenkübel (um 1850) [17] (rechts)

In seiner frühen Entwicklungsphase in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde der Baustoff Beton bzw. Eisenbeton zunächst eher wie die traditionell bekannten Baustoffe Stein und Holz verwendet, was sich unweigerlich auf die noch fehlenden mechanischen Materialkenntnisse und Einsatzmöglichkeiten zurückführen lässt. Die ersten Konstruktionen aus Beton, wie z. B. der Blumenkübel von Joseph Monier (Abbildung 2-2, rechts) oder die ab 1850 in Deutschland hergestellten Betonrohre, waren daher aus geometrischer Sicht simpel, wodurch auch der relativ einfache zimmermannsmäßige Beton-Schalungsbau eher eine funktionale Nebenerscheinung darstellte.

Es dauerte bis zum Ende des 19. bzw. Beginn des 20. Jahrhunderts, bis der Beton nicht nur als schnell zu produzierendes, sondern auch als beliebig zu formendes plastisches Baumaterial in statischer Hinsicht erkannt wurde und entsprechende Konstruktionsregeln, wie die 1904 veröffentlichten Preußischen „Bestimmungen für die Ausführung von Konstruktionen aus Eisenbeton im Hochbau“, für dessen Einsatz zur Verfügung standen [18]. Diese zunehmende Beherrschung des Materials ermöglichte den Entwurf und den Bau von statisch intelligenten und massenminimierten Konstruktionen, wie dieses besonders an den Bogenbrücken und weitgespannten unterzugslosen Pilsdecken von Robert Maillart abzulesen ist [19].

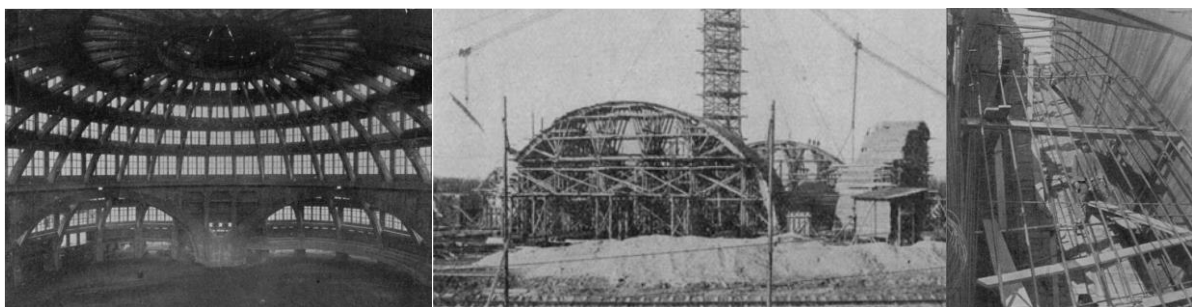


Abbildung 2-3: Jahrhunderthalle in Breslau: Innenansicht der Rippenkuppel aus Stahlbeton 1911–1913 [20] (links), Lehrgerüst und Schalung der Hauptbögen [20] (Mitte), Schalungsinnenansicht und Eisenlagen der Hauptbögen [20] (rechts)

Ein weiteres Beispiel ist die für ihre Zeit herausragende Jahrhunderthalle in Breslau (1911–1913, Abbildung 2-3) von Max Berg. Die aus 32 Eisenbetonrippen bestehende trassierte Kuppel besitzt eine Spannweite von 65 Metern und übertrifft damit erstmals seit der Antike das als Vorbild zur Gesamtarchitektur dienende Pantheon in Rom [18].

Mit Zunahme der Größe und Komplexität der aus Eisenbeton (oder Stahlbeton, in welchen er 1920 umbenannt wurde) hergestellten Bauwerke wurden dabei auch immer höher werdende Anforderungen an den Beton-Schalungsbau gestellt. Wurden die ersten hölzernen Beton-Schalungen noch

ausschließlich von Zimmermännern auf Basis von Erfahrungswerten hergestellt, bedurften Beton-Schalungen und ihre Traggerüste, wie die für die Betonage der Rippen der Jahrhunderthalle (Abbildung 2-3, Mitte und rechts), bereits detaillierter Überlegungen und statischer Bemessungen von Ingenieuren.

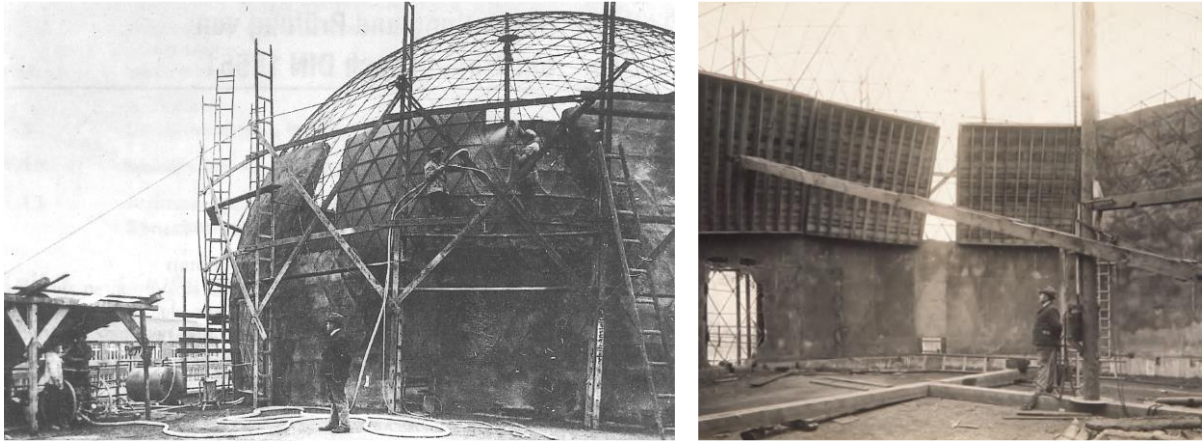


Abbildung 2-4: Erstes Zeiss-Planetarium Jena: Herstellen der Betonkuppel auf dem Dach des Zeiss-Werks, 1924 [21] (links), Einschalen des Netzwerks (rechts) [22]

Das Aufkommen neuer Verarbeitungstechniken für Beton, wie u. a. das im Jahre 1908 vom US-Amerikaner Carl E. Akeley entwickelte und später in Deutschland unter der Bezeichnung Torkretverfahren eingeführte Betonspritzverfahren, erweiterte die Anwendungsmöglichkeiten und besonders die Formfreiheit im Betonbau. Neben der Anwendung zur nachträglichen Verstärkung bzw. zum Instandsetzen von Betonbauteilen, erlaubt das Betonspritzverfahren u. a. die Herstellung dünner und weitgespannter Schalentragswerke etwa nach der Zeiss-Dywidag-Schalbauweise, welche ihre Namensgebung dem Bau des ersten Zeiss-Planetariums in Jena (Abbildung 2-4) verdankt. Obwohl das Betonspritzverfahren nur einhäuptige<sup>2</sup> Schalungen benötigt, war die Herstellung der doppelgekrümmten Innenschalung der Kugelschale in der bekannten zimmermannsmäßigen Holzbauweise bereits damals komplex und kostenintensiv. Um den Schalungsaufwand und die damit verbundenen Kosten zu minimieren, entwickelte die Firma Dyckerhoff & Wiedemann AG unter Franz Dischinger, dem Konstrukteur der Schale, das in Abbildung 2-4, rechts dargestellte Schalungsverfahren. Hierbei konnten die aufgrund der Halbkugelform wiederverwendbaren, doppelt gekrümmten Holzschalungselemente von innen über einen im Mittelpunkt der Schalenkugel aufgehängten Kranausleger für das Betonspritzen in Position gehalten und anschließend einfach zum nächsten Betonierabschnitt versetzt werden.

Ebenfalls Anfang des 20. Jahrhunderts fand der Beton auch hinsichtlich rein ästhetischer Belange erstmals Einzug in die Architektur. Wurde Beton bis dato als kostengünstiges und scheinbar minderwertiges Material angesehen und deshalb oftmals verkleidet, zeigte der Architekt Frank Lloyd Wright bei der Unitanierkirche in Oak Park, Chicago, 1906 als eines der frühesten Zeugnisse der Moderne eine andere, neue Architektur, bei welcher sich der Abdruck der Schalungstechnik bewusst auf den Oberflächen der zur Sicht gestellten Betonfassade ablesen lässt [18].

---

<sup>2</sup> einhäuptige Schalungen (auch ankerlose oder einhäufige Schalungen) sind Schalungen mit einer einseitigen Schalhaut, bei welcher der Betondruck über den Schalungsträger in eine einseitige, meist verankerte Tragkonstruktion abgeleitet wird





Abbildung 2-5: Zweites Goetheanum Dornach/Schweiz von Rolf Steiner, erbaut in den Jahren 1925 bis 1928 (links), Komplexer manueller Schalungsbau für die Fassade des zweiten Goetheanum Foto: Goetheanum Dokumentation (rechts) [18]

Die Fähigkeiten des Betons, nicht nur Oberflächenstrukturen, sondern auch sich selbst tragende, größere, freigeformte plastische Strukturen durch Abformung einer entsprechenden Schalung wiederzugeben, inspirierte den Anthroposophen Rudolf Steiner zur Formgebung des zweiten Goetheanums in Dornach, Schweiz 1925 (Abbildung 2-5, links). Der monolithische Symbolbau mit seinen doppelsinnig gekrümmten Fassaden und den sich nach unten verjüngenden Fassadensäulen (Luftwurzeln) gilt als erstes Beispiel einer „organischen Architektur“, die ihre Form nicht maßgeblich durch statische Berechnungen, sondern durch den gewünschten plastisch monumentalen Ausdruck und die lichtabhängige Ästhetik erhalten hat [18]. Wegen seiner einzigartigen Formgebung und der Anwendung von Sichtbeton kann das zweite Goetheanum als ein Meilenstein in der Architektur des Betonbaus angesehen werden [23] und inspirierte im Folgenden wahrscheinlich stark die moderne Architektur von le Corbusier über Frank O. Gehry bis hin zu Zaha Hadid. Aufgrund der Vielzahl an mehrsinnig gekrümmten Flächen und scharfen Graten war der Schalungsaufwand für den Betonbau des zweiten Goetheanum extrem hoch.

Die komplexen feingliedrigen hölzernen Bretterschalungen (Abbildung 2-5, rechts) [24] für das zweite Goetheanum wurden unter Leitung des Zimmermanns mit Schiffbauerfahrung Heinrich Liedvogel (1904–1977) in der eigenen Schreinerei ausgeführt und zeichneten sich dadurch aus, dass in Analogie zum Bootsbau schmale Bretter im nassen Zustand auf Spanten gebogen wurden. Die sich aus der verwendeten Schalungstechnik ergebende Brettschalungsstruktur der Sichtbetonoberfläche war zur Bauzeit zwar eher ein Nebeneffekt, in der heutigen Betrachtung des Gebäudes kommt ihr aber für das Gesamterscheinungsbild eine besondere, erhaltenswerte Bedeutung des gestalterischen Ausdrucks zu.

Um diese Bedeutung für den Denkmalcharakter zu erhalten, wurde bei der Sanierung der Fassade des rückwärtigen Bühnentrakts in den 1990er Jahren die Brettschalungsstruktur aufwendig mit neuem Beton nachgebildet. Für die ebenen Bauteile wurden dabei zur Reduzierung der Kosten anstelle einer echten Bretterschalung wiederverwendbare Silikon-Negativmatrizen, als Abdruck einer Bretterschalung auf einer Trägerschalung montiert, verwendet. Da die Anwendung ebener Matrizen nicht für die Anwendung komplex geformter Bereiche möglich war, wurden für die Sanierung der doppelsinnig gekrümmten Flächen auf Basis der ursprünglichen Technik individuell angefertigte Bretterschalungen hergestellt. Wegen des aus formalen Gründen wenig überzeugenden Ergebnisses der Silikonmatrizen und der aufgrund der heutigen hohen Lohnkosten unverhältnismäßig hohen Herstellungskosten der individuell angefertigten „echten“ Bretterschalungen wurden die verbleibenden Sichtbetonflächen der Fassade während der zweiten Sanierung 2015 lediglich lokal ausgebessert und mit einer Tiefenhydrophobierung behandelt [25].



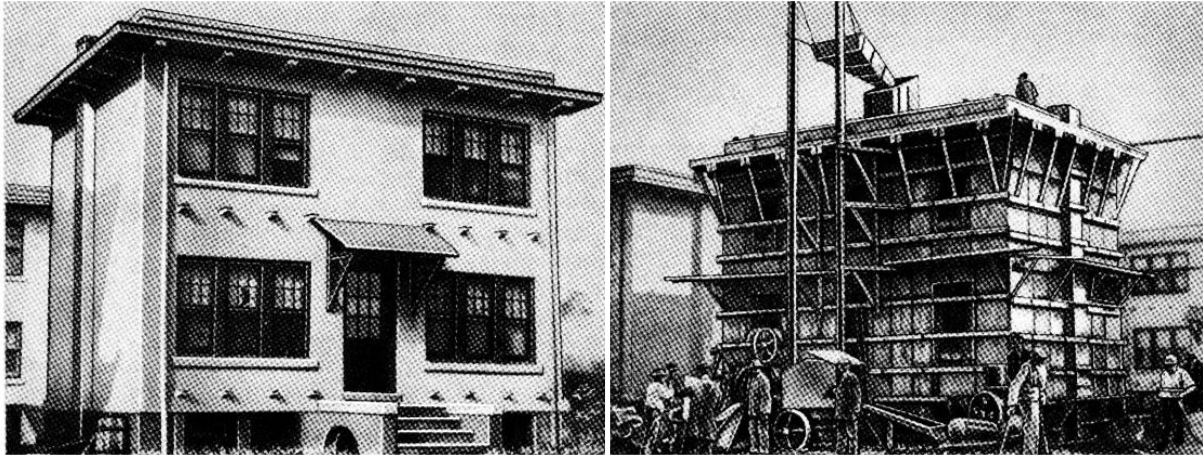


Abbildung 2-6: Beton-Fertighaus von Thomas Alva Edison 1910 (links), gusseiserne Schalung des „Betongießhauses“ (rechts) [26]

Obwohl die Lohnkosten zur Herstellung zimmermannsmäßiger Schalungen zu Beginn des 19. Jahrhunderts deutlich unter denen der heutigen Zeit lagen, waren sie auch schon damals, so wie heute bei der Sanierung des zweiten Goetheanums, einer der Hauptkostentreiber für den Betonbau. Dieses erkannte bereits der vielseitige Erfinder und zeitweise größte Hersteller von Portlandzement in den USA, Thomas Alva Edison, was ihn zu der Idee der serienmäßigen Herstellung von Beton-Fertighäusern führte. Bei dieser sollte auf der Baustelle Beton in gusseiserne wiederverwendbare Schalungen gegossen werden (Abbildung 2-6) [18]. Das 1908 zum Patent angemeldete System sah dabei vor, dass das gesamte herzustellende Haus mit gusseisernen Schalungen einkleidet und in einem Guss von oben her betoniert werden sollte. Obwohl er 1910 in der Nähe von West Orange, USA, mehrere Häuser mit diesem Verfahren erfolgreich errichtete, fand sich kein Produzent, weswegen Edison seine Vision der „am Fließband hergestellten“ kostengünstigen Häuser für jedermann wieder aufgeben musste [26].

Zwar wurde die ursprüngliche Idee der System- und Stahlschalungen von Edison in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts u. a. in Frankreich und später in Deutschland für Rüstungsbauten weiterentwickelt, bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges (1939–1945) prägte aber weiterhin der konventionelle zimmermannsmäßige Schalungsbau den Betonbau. Vornehmlich der hohe Bedarf an Wohnungen und der Mangel an Holz im zerstörten Europa nach dem Zweiten Weltkrieg führten zu diversen Entwicklungen im Schalungsbau, weg vom bisherigen reinen Schalungshandwerk hin zu einer neuen Schalungstechnik mit Systemlösungen.

Diese Entwicklung konzentrierte sich dabei zuerst auf große ebene Bauteile wie Wände und Decken, wie sie im hohen Maß in der Architektur der asketischen Nachkriegsmoderne zu finden sind. Dabei blieb vorerst die konventionelle Ausführungsart erhalten, es wurden aber zunehmend industriell gefertigte und langlebigere Bestandteile für die Schalungen verwendet. Lose Bretter für die Schalhaut wurden durch Schalungsplatten, die schalhauttragenden Kanthölzer durch längenverstellbare Stahl- (Hico-Träger) und Holzträger (Steidle-Träger), Drahtverspannungen durch Gewindeanker und Rundholzabstützungen durch längenverstellbare Stahlrohrstützen ersetzt. Die zunehmende Tragkraft der Baustellenkrane ermöglichte dabei auch immer größer werdende Schalungselemente bzw. -einheiten und damit die kostengünstige Serienfertigung von Wänden und Decken in Stahlbeton. In den 1970er Jahren erreichte diese Entwicklung ihren Höhepunkt und es entstand das heute noch in seiner Form verwendete Trägerschalungssystem [27]. Ebenfalls nach dem Zweiten Weltkrieg entstanden auf Basis der Gusseisen- und Stahlschalungen erste Rahmenschalungen, auch Rahmentafeln genannt, welche aber noch sehr unhandlich und schwer waren. Durch die steigenden Anforderungen an die Komplexität, Variation und Seriengröße von Stahlbetonbauteilen u. a. durch den aufkommenden Formenpluralismus der postmodernen Architektur wurde besonders ab den 1980er Jahren die Rahmenschalung zu den heutigen Rahmenschalungs-Systemen für rechteckige und ebene Formen weiterentwickelt. Durch die Verwendung von Stahlrahmen aus Vierkantrohren, austauschbaren Schalungsplatten (selbsttragenden Schalungshäuten) und der Entwicklung von genormten Verbindungs-, Verankerungs- und Stützelementen entstand eine Modularität, welche eine hohe

Formenvielfalt ermöglicht, kaum Vorfertigungsarbeiten benötigt und somit auch bei kleinen Serien sehr wirtschaftlich ist [13].

Im Zuge der Entwicklung dieser in sich abgestimmten Schalungssysteme (Träger- und Rahmenschalung) für vornehmlich ebene oder unidirektional gekrümmte Betonbauteile wurden parallel dazu die Traggerüstkonstruktionen von Schalungen für Spezialanwendungen, wie die Gleit-, Kletter-, Freivorbau- und Tunnelschalungssysteme, entwickelt. Auf dem Gebiet der Sonderschalungen für freigeformte bzw. multi-achsig gekrümmte Betonbauteile gab es hingegen bis in die 1990er Jahre kaum neue Entwicklungen zu verzeichnen, sodass für die Herstellung der mehrachsig gekrümmten Betonkonstruktionen, von u. a. Pier Luigi Nervi (ab 1925), Felix Candela (ab 1950), Heinz Isler (ab 1950) oder Ulrich Müther (ab 1964) [24], feingliedrige hölzerne Bretterschalungen in manueller Zimmermannsbauweise wie beim zweiten Goetheanum verwendet wurden.

Durch den Einzug von leistungsfähigen 3D-CAD-Zeichnungs- und CAE-Berechnungsprogrammen in die Architektur- und Ingenieurbüros Anfang der 1990er Jahre wurde das Formenspektrum des Bauwesens nahezu unbegrenzt erweitert. Waren in der „vordigitalen Zeit“ architektonische Formen noch auf rein mathematische Formen begrenzt, um diese entwerfen, berechnen und bauen zu können, schien die neu entstandene sogenannte „Freiform-Architektur“ formal fast unbegrenzt zu sein. Durch das Vorliegen digitaler Geometriedaten der Gebäude aus den Entwurfsprozessen und die Entwicklungen in den CNC gesteuerten Fertigungstechniken konnten in dieser Zeit erstmals auch großformatige Schalungskörper in nahezu jeder beliebigen Form in einem sogenannten „digital workflow“ aus subtraktiv gefrästen Kunststoffen hergestellt werden [28].

Der Architekt Frank O. Gehry, welcher die Software CATIA bereits 1992 für den Entwurf und den Bau der „Fisch Skulptur“ in der Eingangshalle des Business Komplex Vila Olimpica in Barcelona verwendete, gilt als einer der Pioniere auf dem Gebiet dieser digitalen Freiform-Architektur [29]. Mit dem ebenfalls auf diese Weise entworfenen und gebauten Guggenheim-Museum in Bilbao gelangte Frank O. Gehry 1997 zu Weltruhm und löste den sogenannten Bilbao-Effekt aus. In den folgenden Jahren entstanden u. a. durch Frank O. Gehry, Coop Himmelblau oder Zaha Hadid weitere prestigeträchtige Freiform-Architektur-Bauprojekte in Betonbauweise.

Das von Zaha Hadid als „überdachte künstliche Landschaft aus Kratern, Höhlen, Terrassen und Plateaus, als Manifestation von komplexen, dynamischen und fließenden Räumen“ (Abbildung 2-7, links) [30] digital entworfene Wissenschaftszentrum phaeno in Wolfsburg (2005) (Abbildung 2-7, Mitte) stellt dabei ein herausragendes Beispiel für die technischen Möglichkeiten und Herausforderungen des freigeformten Betonbaus, besonders unter Verwendung von selbstverdichtendem Beton, dar.

Das phaeno ist dabei auch ein exzellentes Beispiel für die Komplexität und Schwierigkeiten, die bei der Realisierung von Freiformen im Betonbau auftreten können. Da bei dem Entwurf die „gestalterischen Logiken“ [30] und nicht strukturelle Effizienz oder effiziente Herstellung entwurfsprägend waren, mussten sich die Konstruktion und der Schalungsbau an die vorgegebene Geometrie anpassen. Dieses führte einerseits zu einem hohen Bewehrungsgrad im Beton, welcher das Betonieren erschwerte, und andererseits zu einem extrem komplexen Sonderschalungsbau, welcher durch eine Kombination unterschiedlicher Schalungstechniken realisiert wurde. Für die unidirektional gekrümmten Bereiche der Stützen-Cones und Deckenfelder kamen dabei angepasste Trägerschalungssysteme (Abbildung 2-7, rechts), für die multidirektional gekrümmten Bereiche, vornehmlich im oberen Kragenbereich der Stützen-Cones am Übergang zur Decke, Schalungskörper aus CNC gefrästem und beschichtetem expandiertem Polystyrol (EPS) und für die Bodenfenster Polyvinylchlorid (PVC) Schalungskörper (Abbildung 2-8, links und Mitte) zum Einsatz. Diese EPS und PVC Schalungskörper mussten nach nur einer Verwendung als Abfall entsorgt werden (Abbildung 2-8, rechts).



Abbildung 2-7: phaeno Wolfsburg: Unteransicht digitales Modell (links oben) und digitales Formfindungsmodell (links unten), Südansicht Stützen-Cones mit Decke über EG (Mitte) ©Foto: Klemens Ortmeier, Hannover, uniachsial gekrümmte Trägerschalung eines Stützen-Cones (rechts) ©Fotos: Klemens Ortmeier, Hannover



Abbildung 2-8: phaeno Wolfsburg: Schalung im oberen Kragenbereich der Stützen-Cones am Übergang zum Decke, Schalungskörper aus CNC gefrästem und beschichtetem EPS (links), PVC Schalungskörper für Bodenfenster vor Betonierung der Decke über EG (Mitte) ©Foto: Klemens Ortmeier, Hannover, Abfall: PVC Schalungskörper für Bodenfenster und EPS (rechts) ©Foto: Sebastian Hoyer, Braunschweig

Das Beispiel des phaeno zeigt, dass es mit den heutigen digitalen Möglichkeiten ohne weiteres technisch möglich ist, freigeformte Betonbauten mit Sonderschalungen herzustellen, dass diese aber trotz Einsatz von CNC Technik immer noch aufwendige Sonderlösungen darstellen, deren extrem hohe Herstellungskosten meist nur für vereinzelte prestigeträchtige Bauten akzeptiert werden.

Basierend auf der entwurfsgeprägten Vorreiterrolle der Architektur im Bereich des freigeformten Betonbaus, werden die Möglichkeiten der freien Formbarkeit des Baustoffes Beton zunehmend auch von Ingenieuren wiederentdeckt. Mithilfe von immer leistungsfähigeren computergestützten Entwurfs-, Berechnungs- und Optimierungsprogrammen (CAE) werden im Zusammenspiel mit neu entwickelten Betonen und durch die Notwendigkeit der Materialeinsparung nach dem Prinzip „form follows force“ immer neue Anwendungsfelder für freigeformten Beton im Ingenieurbau oder sogar Maschinenbau erschlossen. Die unterschiedlichen Forschungsprojekte im DFG Schwerpunktprogramm 1542 „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“ zeigen dieses eindrucksvoll. Diese Entwicklungen sind dabei nur im Zusammenspiel einer ganzheitlichen Betrachtung von Design, Material und besonders einer effizienteren Herstellung möglich. Um den Aufwand und besonders die aktuell noch hohen Kosten von Sonderschalungen zu minimieren, werden deshalb diverse neue Systeme und Bautechnologien zur Herstellung von freigeformten Betonbauteilen durch die Industrie und Forschung entwickelt. Neben unterschiedlichen neuen Schalungssystemen wird dabei in der Forschung auch ein großer Schwerpunkt auf das sogenannte Betondrucken gelegt, wodurch in der Zukunft Schalungen zur Herstellung von Betonbauteilen nicht mehr oder nur im geringen Maße benötigt werden könnten.

## 2.2 Begriffsabgrenzungen, Definitionen und allgemeiner Stand der Technik im Beton-Schalungsbau

### 2.2.1 Bestandteile der Beton-Schalung (Schalung)

Der Begriff „Beton-Schalung“ oder vereinfacht im Folgenden auch nur Schalung genannt, lässt sich nach dem Deutschen Wörterbuch [31] auf die Begriffe: Verschalung, Schalwerk bzw. Verschalen als eine „Wand von Pfählen oder Bohlen“ zurückführen. Der Duden [32] beschreibt die Schalung als einen Begriff der Bautechnik als eine „aus Brettern, Holzplatten o. Ä. hergestellte Hohlform zum Gießen von Betonteilen“. Gemäß der DIN EN 12812 Traggerüste (Temporäre Konstruktionen für Bauwerke) ist die „Schalung: Teil der temporären Konstruktion, die dem Frischbeton die erforderliche Form gibt und ihm als Auflager dient“ [33]. Wikipedia definiert: „Die Schalung ist die Gussform, in die Frischbeton zur Herstellung von Betonbauteilen eingebracht wird, ... und hat somit als entsprechendes Negativ des zu erstellenden Betonteils lediglich formgebenden Charakter“ [34]. Des Weiteren sind in [27], [13] und [35] allgemeine Definitionen des Begriffes der Schalung zu finden. Da Schalungen für Beton selbst nicht normativ geregelt sind, sondern lediglich einige ihrer Bestandteile und das Herstellungsverfahren des Betongusses (Betonieren) in Schalungen, welches nach [36] zu den Urformverfahren der Gruppe 1.3.1. gehört, werden für diese Arbeit im Folgenden u. a. der Begriff „Schalung“ und zur Begriffsabgrenzung die System- bzw. Bestandteile von Schalungen definiert.

Die **Schalung** ist ein flächenabschließendes und für den Frischbeton (bis zur seiner Erhärtung) als Auflager dienendes, meist temporäres Bauteil, welches es ermöglicht, Betonteile in der gewünschten Form im Rahmen der gewählten Herstellungstoleranzen zu erstellen. Die Schalung besteht dabei mindestens aus dem Schalungsbestandteil (bei aufeinander abgestimmten Systemen dem Systemteil) der Schalungshaut. Diese kann zur Einhaltung der gewählten Herstellungstoleranzen aufgrund von auftretenden Verformungen, vornehmlich resultierend aus dem Frischbetondruck (Einwirkung), durch weitere Bestandteile wie Schalungsträger, Gurtungen, Verankerungen, Verbindungsmittel und Zubehörteile ergänzt werden. Kategorisiert werden Schalungen oder Schalungssysteme meist nach den damit herzustellenden Bauteilkategorien wie z. B.: Stützen-, Wand-, Decken- und Sonderschalung in ein- oder mehrhäutiger Ausführung und ihrer Konstruktionsform.

Besteht eine Schalung aus mehreren in sich abgeschlossenen Segmenten, Modulen oder Elementen, welche zu einer Gesamtschalung zusammengesetzt werden können, werden diese in dieser Arbeit als **Schalungselemente** bezeichnet.

Die **Schalungshaut** wird definiert als die innere Oberfläche (erste homogene Materialschicht) einer Schalung, welche in Kontakt zum Frischbeton steht und der Betonoberfläche die gewünschte Form, Struktur, Betonoberflächenqualität und Maßhaltigkeit gibt. Die Schalhaut ist demnach immer ein Teil der Schalung und wird in zwei Kategorien unterteilt [37]:

Vorsatzschalungshäute (z. B. pneumatisch gestützte Schalungsmembrane) sind nicht selbsttragend und bedürfen ggf. einer vollflächigen Unterstützung durch einen Schalungsträger. Selbsttragende Schalungshäute, bei welchen die Schalungshaut bereits mit einem vollflächigen Schalungsträger wie z. B. bei Schalungsplatten (kunststoffbeschichtete Furniersperrholzplatten, wie diese normativ in [38] geregelt sind) verbunden ist, benötigen daher ggf. lediglich eine punktuelle Unterstützung durch einen Schalungsträger. Bei Schalungen aus Wachs ist das dem Betonbauteil formgebende Wachs nach dieser Definition eine selbsttragende Schalungshaut und je nach Dicke und Form der Wachsschalung ebenfalls der Schalungsträger.

Da die fertige Betonoberfläche das Spiegelbild der Schalungshaut darstellt, ist die Auswahl eines geeigneten Materials in Wechselwirkung mit einem geeigneten Schalungsträger zum Erreichen der an das fertige Betonbauteil gestellten Anforderungen essentiell.

Im Besonderen hat die Schalhaut die folgenden Anforderungen zu erfüllen:

- Gestaltgebung der Oberfläche – Betonoberflächenqualität, Ebenheit bzw. Glattheit / Rauigkeit, Saugfähigkeit, Oberflächentextur (Struktur), Fugenbild und Befestigung der Schalhaut
- Maßhaltigkeit und Einhaltung der gewählten Herstellungstoleranzen
- Einsatzhäufigkeit / Robustheit
- Aufnahmefähigkeit von Bauhilfsstoffen wie z. B. Trennmittel
- Betonverträglichkeit – der Werkstoff soll nicht vom frischen oder erhärteten Beton angegriffen werden und auch nicht die chemische Reaktion beim Abbinden des Betons stören.

Der **Schalungsträger** bietet der Schalhaut die notwendige Auflagerung zur Einhaltung der gewählten zulässigen Verformung der Schalhaut gegenüber dem Frischbetondruck. Der Übergang von der Schalhaut zum Schalungsträger ist dabei besonders bei selbsttragenden Schalungshäuten meist fließend. Bei der Verwendung von Einzelbrettern als selbsttragende Schalhaut war besonders in der Vergangenheit das Kantholz der Schalungsträger. Die Art des Schalungsträgers ist bei den heutigen vornehmlich für ebene Bauteile eingesetzten Schalungssystemen namensgebend. Bei Träger-Schalungen kommen vornehmlich industriell gefertigte Schalungsträger aus Holz nach EN 13377 [39] mit Dreischicht- oder Gitterstege sowie nach statischen Erfordernissen unterschiedliche Stahl- und Aluminiumprofile zum Einsatz. Bei Rahmenschalungen bilden die Rahmen aus Stahl- oder Aluminiumvierkantprofilen den Schalungsträger. Bei Wachsschalungen ist der Schalungsträger je nach Dicke und Form des Wachskörpers das Wachs selbst oder eine das Wachs tragende bzw. umschließende Stahl- oder Holzträgerplatte.

Die **Gurtung** dient als Auflager für die Schalungsträger und leitet die auftretenden Lasten in das Traggerüst bzw. die Verankerungen und Verbindungsmittel ab. Im Sonderfall der Rahmenschalung vereint der Rahmen oftmals die Funktion von Schalungsträger und Gurtung. Bei Deckenschalungen wird die Gurtung auch als Joch bezeichnet [27]. Je nach statischen Erfordernissen kommen für Gurtungen Stahl-Walzprofile oder Holzträger in Analogie zu den Schalungsträgern der Träger-Schalung, meist jedoch mit höherem Flächenträgheitsmoment, zum Einsatz.

**Verbindungsmittel und Anker** sind vornehmlich mechanische Verbindungen wie Nägel, Schrauben, Gewindestangen, Muttern sowie systembedingte Spezialverbindungen wie z. B. Bolzenverbindungen und Richtschlösser (Klemmverbindungen bei Rahmenschalungen) und die für Zugbelastungen ausgelegten unterschiedlichen Ankerverbindungen. Besonders die Schalungsanker zur Verbindung von zwei parallelen Wandschalungselementen zur Kompensation des Frischbetondrucks, wie diese in DIN 18216 [40] normativ geregelt sind, sind hierbei hervorzuheben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden **Traggerüstkonstruktion bzw. Untergerüst, Trag- oder Unterkonstruktion** nicht als Teil der Schalung, sondern als ggf. notwendige Unter- und Stützkonstruktion für die Schalung definiert. Neben der Positionierung und Unterstützung der Schalung zur Erreichung der geforderten Herstellungstoleranzen dienen diese zur Aufnahme und Ableitung der auftretenden Eigen- und Frischbetonlasten in den Baugrund. Schalungen bzw. ihre Bestandteile können hingegen Teil der Traggerüstkonstruktion sein [33]. Für Spezialschalungsverfahren wie z. B. Gleit-, Kletter-, Umsetz-, Tunnel- oder Brückenschalungsverfahren ist die entsprechende Traggerüstkonstruktion, mit welcher die Schalung gestützt bzw. bewegt wird, namensgebend.

**Trennmittel** sind Bauhilfsstoffe, welche vor dem Betonieren auf die Schalhaut aufgetragen werden, um die Adhäsions- oder Anhaftungskräfte zu verringern und ein optimales Lösen der Schalung vom Beton zu ermöglichen. Hierdurch wird das Ausschalen (die Trennung von erhärtetem Beton und Schalhaut) erheblich erleichtert und zudem das Entstehen von Schäden (Abbrüchen) an empfindlichen Bereichen wie Kanten und Ecken verhindert. Des Weiteren dienen Trennmittel dem Schutz der Schalung und erleichtern deren Reinigungsaufwand. Je nach Anforderung an die herzustellende Betonoberfläche (z. B.: Sichtbetonklasse) und in Abhängigkeit des Schalhautmaterials ist die Wahl eines richtigen Trennmittels für das Erreichen der gewünschten Betonoberflächenqualität erheblich. Ein falsches Trennmittel bzw. unsachgemäßes oder übermäßiges Auftragen kann von einer Fleckenbildung über

einen Haftungsverlust späterer Anstriche, Putze, Kleber etc. bis hin zu einer Schädigung der Betonoberfläche, ggf. auch der Schalhaut führen.

Ihrem chemischen Aufbau folgend, werden Trennmittel [13] in fünf verschiedene Arten unterteilt:

1. Emulgierbare Produkte (z. B. emulgierbare Schalungsöle und -wachse)
2. Pure Öle (z. B. wasserunlösliche Schalungsöle, Form- und Mineralöle)
3. Pasten (z. B. Schalungspasten, vornehmlich aus Wachsen)
4. Wachse (z. B. Schalungswachse im festen Zustand)
5. Chemisch reagierende Trennmittel (chemischer Aufbau je nach Produkt unterschiedlich)

Aufgrund der Lipophilie, also der Öllöslichkeit von Wachsen, eignen sich für Wachsschalungen keine Trennmittel auf Ölbasis, da sich diese mit dem Wachs verbinden. Begleitversuche am ITE haben gezeigt, dass pure Mineralöle von Wachs „absorbiert“ werden und somit bereits nach einigen Minuten keine ausreichende Trennwirkung mehr vorhanden ist. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden daher ausschließlich pastöse Trennmittel auf Wachsbasis, vornehmlich das Produkt Ciri LM-33 der Firma GRACE, verwendet, mit welchem eine gute Trennwirkung zwischen Wachsschalung und Beton erreicht werden konnte. Da die homogene Applikation mit einem Lappen auf komplexe Schalungsgeometrien, die weiterhin starke Adhäsion beim Entschalen, das Auftreten leichter Verfärbungen und der Verbleib von Trennmittelresten auf der Betonoberfläche noch verbesserungswürdig sind und sich ggf. auf das verwendete Trennmittel zurückführen lassen, wird für weiterführende Forschungsarbeiten empfohlen, Versuche mit alternativen Trennmitteln, z. B. mit sprühbaren Wachsemulsionen, durchzuführen.

### 2.2.2 Anforderung an die Schalung

Im Gegensatz zu den konstruktiven Eigenschaften von Beton, wie diese u. a. in [41] und [42] geregelt sind, sind die zumeist aus architektonischen Ansprüchen resultierenden Anforderungen an das Aussehen einer Betonoberfläche, **die Betonoberflächenqualität (Sichtbeton)**, keine objektiv messbaren Größen und somit auch nicht besonders normativ geregelt. Der Versuch einer Normung „Betonoberflächen und Schalungshaut“ mit der DIN 18217 wurde mittlerweile zurückgezogen. Grundlegend können Betonoberflächen nach Merkblättern des Deutschen Beton- und Bautechnikvereins in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: Betonoberflächen ohne und mit besonderen Anforderungen an das Aussehen. Betonoberflächen ohne besondere Anforderungen sind Betonoberflächen, bei welchen lediglich technische Minimalanforderungen an die Oberflächenqualität wie z. B. Rostfreiheit gestellt werden. Betonoberflächen mit besonderen Anforderungen an das Aussehen bzw. die Oberflächenqualität, welche im Allgemeinen auch als „Sichtbetonoberflächen“ bezeichnet werden, sind „der nach Fertigstellung sichtbare Teil des Betons, welcher Merkmale der Gestaltung und der Herstellung erkennen lässt (Form, Textur, Farbe, Schalungshaut, Fugen u. a.) und die architektonische Wirkung eines Bauteils oder Bauwerks maßgebend bestimmt“ [43].

Um trotz der fehlenden allgemeinverbindlichen Regeln und Vorschriften die Anforderungen an das Aussehen von „Sicht-“Betonoberflächen einheitlich definieren zu können, wurden im DBV Merkblatt Sichtbeton [41] die unterschiedlichen Sichtbetonqualitäten in vier Sichtbetonklassen (SB 1 bis SB 4) eingeteilt. Neben empfohlenen Anforderungen an die Ausführung ist die erreichbare Sichtbetonklasse dabei, wie in Tabelle 1 dargestellt, von unterschiedlichen Anforderungen bzw. Anforderungsklassen, nämlich Textur, Porigkeit, Farbtongleichmäßigkeit, Ebenheit bzw. Formtreue, Arbeits- und Schalfugen sowie der verwendeten Schalungshaut, abhängig.

Besonders die Materialbeschaffenheit der Schalungshaut, ihr Grad an Wasseraufnahmefähigkeit und ihre Schalungshautklasse (SHK 1, SHK 2 und SHK 3, welche den zulässigen Zustand der Schalungshaut definieren – Tabelle 2: Schalungshautklassen aus) beeinflussen dabei die Güte der Betonoberfläche in einer besonderen Weise. Obwohl saugende Schalungshäute grundsätzlich Sichtbetonoberflächen mit weniger Poren und geringeren Farbunterschieden (je Bauteil) ermöglichen,



## 2. Stand der Technik und Forschung, relevante Patente

werden in der Bauwirtschaft vornehmlich nicht saugende Schalungshäute zur Herstellung von Sichtbetonflächen angewendet.

Tabelle 1: Sichtbetonklassen und zugehörige Anforderungsklassen aus [43]

S			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Z	Sichtbetonklasse		Beispiele	Anforderungen an geschaltete Sichtbetonflächen nach Klassen bezüglich						Weitere Anforderungen		Herstellkosten		
				Textur	Porigkeit <sup>1</sup>		Farbtongleichmäßigkeit <sup>1,2</sup>		Ebenheit	Arbeitsfugen und Schalungsstöße	Erprobungen <sup>3</sup>		Schalungshaut <sup>4</sup>	
					s	ns	s	ns						
1	Sichtbeton mit	geringen Anforderungen	SB 1	Betonflächen mit geringen gestalterischen Anforderungen, z. B. Kellerräume oder Bereiche mit vorwiegend gewerblicher Nutzung	T1	P1		FT1		E1	AF1	freigestellt	SHK1	niedrig
2		normalen Anforderungen	SB 2	Betonflächen mit normalen gestalterischen Anforderungen, z. B. Treppenhäuseräume; Stützwände	T2	P2	P1	FT2	FT2	E1	AF2	empfohlen	SHK2	mittel
3		besonderen Anforderungen	SB 3	Betonflächen mit hohen gestalterischen Anforderungen, z. B. Fassaden	T2	P3	P2	FT2	FT2	E2	AF3	dringend empfohlen	SHK2	hoch
4			SB 4	Betonflächen mit besonders hohen gestalterischen Anforderungen, repräsentative Bauteile	T3	P4	P3	FT3	FT2	E3	AF4	erforderlich	SHK3	sehr hoch

<sup>1</sup> s = saugend bzw. ns = nicht saugende Schalungshaut; siehe Tabelle 4

<sup>2</sup> Der Gesamteindruck einer Sichtbetonfläche ist i. d. R. erst nach längerer Standzeit (u. U. nach mehreren Wochen) beurteilbar. Die Farbtongleichmäßigkeit ist aus dem üblichen Betrachtungsabstand gemäß Abschnitt 7 zu beurteilen.

<sup>3</sup> Anforderungen an Erprobungen siehe auch Tabelle A.6

<sup>4</sup> Anforderungen an Schalungshaut siehe Tabelle 3

**Hinweise für alle Sichtbeton- und Anforderungsklassen:**

Im Sinne dieses Merkblattes ist der Gesamteindruck einer Sichtbetonfläche das grundlegende Beurteilungskriterium für die vereinbarte Sichtbetonklasse. Die gestalterische Wirkung der Sichtbetonfläche ist grundsätzlich nur in ihrer Gesamtwirkung angemessen beurteilbar, d. h. nicht nach Maßgabe absolut erklärter Einzelmerkmale. Die Verfehlung von vertraglich vereinbarten Einzelmerkmalen soll nur dann zu einer Nachbesserungspflicht führen, wenn der Gesamteindruck des betroffenen Bauteils in seiner Gestaltungswirkung gestört ist.

Bei der Beurteilung ist neben den Abschnitten 5.1.2 und 7 dieses Merkblattes auch zu beachten, dass jedes Bauteil als Unikat zu sehen ist. Geringe Unregelmäßigkeiten, z. B. der Textur und des Farbtons, sind in allen Sichtbetonklassen charakteristisch.

Tabelle 2: Schalungshautklassen aus [43]

S	1	2	3	4
Z	Merkmal	Schalungshautklasse <sup>1</sup>		
		SHK1	SHK2	SHK3
1	Bohrlöcher	mit Kunststoff- oder Holzstöpsel oder mit geeignetem Reparaturverfahren verschließen	als Reparaturstellen zulässig <sup>2</sup>	nicht zulässig <sup>3</sup>
2	Nagel- und Schraublöcher	zulässig	ohne Absplitterungen zulässig	nicht zulässig <sup>3</sup>
3	Beschädigung der Schalungshaut durch Innerrüttler	zulässig	nicht zulässig <sup>3</sup>	nicht zulässig
4	Kratzer	zulässig	in SB 2 leichte Kratzer bis 1 mm Tiefe zulässig <sup>5</sup> , sonst als Reparaturstellen <sup>2</sup> zulässig	nicht zulässig <sup>3</sup>
5	Beton- oder Mörtelreste <sup>7</sup>	keine flächigen Anhaftungen	nicht zulässig	nicht zulässig
6	Zementschleier	zulässig	zulässig	nicht zulässig <sup>4</sup>
7	Aufquellen der Schalungshaut in Schraub- bzw. Nagelbereichen oder Welligkeiten an Kantenflächen („Ripplings“)	zulässig	in SB 2 zulässig, in SB 3 nicht zulässig <sup>4,5</sup>	nicht zulässig <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Die Schalungshaut ist vor jedem Einsatz auf ihren definierten Zustand hin zu überprüfen.  
<sup>2</sup> Reparaturen an der Schalungshaut sind sach- und fachgerecht durch qualifiziertes Personal vorzunehmen.  
<sup>3</sup> als Reparaturstellen<sup>2</sup> in Abstimmung mit dem Auftraggeber zulässig  
<sup>4</sup> nach Absprache mit dem Auftraggeber zulässig  
<sup>5</sup> zu tolerieren sind werkstoffbedingte Dickentoleranzen im Kantenbereich  
<sup>6</sup> siehe auch GSV-Merkblatt Mietschalung, Güteschutzverband Betonschalungen e.V., Ratingen [R17]  
<sup>7</sup> Beton- oder Mörtelreste in Nagellöchern und zwischen Schalungshaut und Elementkante sind zulässig.  
Erfahrungen zeigen, dass Auftraggeber häufig größere Toleranzen der Merkmale einer Schalungshaut zulassen. Soweit von den Fußnoten 3 und 4 dieser Tabelle Gebrauch gemacht wird, ist eine Absprache oder Abstimmung mit dem Auftraggeber erforderlich. Diese sollte spätestens im Angebotsstadium getroffen werden bzw. erfolgen.



Für Schalungen aus Wachs ist davon auszugehen, dass sie bei fachgerechtem Einsatz und der Verwendung eines passenden Trennmittels selbst die höchsten Anforderungen des DBV Merkblatts Sichtbeton [43] zur Herstellung von Bauteilen mit einer Betonoberflächenqualität der Sichtbetonklasse SB 4 erfüllen können.

Der Begriff **Präzision** wird im Rahmen dieser Arbeit und in Anlehnung an die DIN 55350 [44] für die Beschreibung der Exaktheit und Genauigkeit der Schalhaut (Schalung) und des damit hergestellten Betonbauteils verwendet. Das Maß der Präzision eines Bauteils ist dabei das Reziproke der summierten, an einem hergestellten Bauteil gemessenen **Maßabweichungen** und die Maßabweichung der Abstand zwischen Soll (z. B. Punkt auf der Oberfläche in der CAD Zeichnung) und Ist (gleicher Punkt auf der Oberfläche des hergestellten Bauteils). Liegt die Maßhaltigkeit eines Bauteils (Abstand zwischen Soll und Ist an einem bestimmten Punkt) innerhalb der vereinbarten zulässigen **Toleranz** (Summe der Beträge des Abstandes der oberen und unteren zulässigen Maßabweichung), ist das Bauteil maßhaltig. In Deutschland werden für die Ausführung von Bauwerken im Hochbau die allgemein gültigen zulässigen (Bau-)Toleranzen in der DIN 18202 [45] baustoffunabhängig geregelt. Zulässige Toleranzen für die Herstellung von Betonfertigteilen werden in der DIN EN 13369 [46] geregelt, welche die DIN 18203-1 [47] abgelöst hat. Im Gegensatz dazu wird im Maschinenbau zur Regelung der Allgmeintoleranzen für metallische Formelemente vornehmlich die DIN ISO 2768 [48] mit vier Toleranzklassen (für Längenmaße: fein, mittel, grob und sehr grob bzw. für Gradheit und Ebenheit: H, K und L) verwendet.

Tabelle 3: Vergleich der zulässigen / empfohlenen Grenzmaße (Toleranzen) in [mm] für beispielhafte Längenmaße (Nennmaße) der DIN 18202 [45], DIN 18203-1 [47], DIN EN 13369 [46] und DIN ISO 2768 [48]

Toleranz nach / bei Nennmaßen von:	1000 mm	2000 mm	4000 mm	Maximalwert
DIN 18202 T1, Z1 (Maße im Grundriss, z.B. Längen)	± 10 mm	± 12 mm	± 16 mm	± 30 mm (über 30 m)
DIN 18203-1 T1, Z1 (Alt – Längen stabförmiger Bauteile)	± 6 mm	± 8 mm	± 10 mm	± 20 mm (über 30 m)
DIN 18203-1 T1, Z4 (Alt – Längen & Breiten von Fassadentafeln)	± 5 mm	± 6 mm	± 8 mm	± 20 mm (bis 10 m; k. A. über 10 m)
DIN EN 13369 (Empfehlungen für zulässige Abweichungen der Länge nach 4.3.1.1 Formel (5))	± 11 mm	± 12 mm	± 14 mm	± 40 mm (über 30 m)
DIN ISO 2768 Tab 1 – fein (f)	± 0,3 mm	± 0,5 mm	k. A.	± 0,5 mm (bis 2 m; k. A. über 2 m)
DIN ISO 2768 Tab 1 – mittel (m)	± 0,8 mm	± 1,2 mm	± 2 mm	± 2 mm (bis 4 m; k. A. über 4 m)
DIN ISO 2768 Tab 1 – grob (c)	± 2 mm	± 3 mm	± 4 mm	± 4 mm (bis 4 m; k. A. über 4 m)
DIN ISO 2768 Tab 1 – sehr grob (v)	± 4 mm	± 6 mm	± 8 mm	± 8 mm (bis 4 m; k. A. über 4 m)

In Tabelle 3 sind für die unterschiedlichen Normen die zulässigen bzw. empfohlenen Toleranzen (Grenzmaße) in [mm] für beispielhafte Längenmaße (Nennmaße von 1000 mm, 2000 mm, 4000 mm und der jeweils in der Norm angegebene Maximalwert) vergleichend dargestellt. Bei diesem Vergleich wird deutlich, dass die Normen für das Bauwesen Längenabweichungen zwischen 0,5 bis hin zu 4 cm (herstellungsbedingt) zulassen und damit aus Sicht des Maschinenbaus, außer bei Fassadentafeln, weit über der Toleranzklasse „sehr grob“ anzusiedeln sind. Ähnlich verhält es sich bei dem Vergleich der in den Normen geregelten zulässigen bzw. empfohlenen Toleranzen für Oberflächen-, Ebenheits- und Winkelabweichungen. Bei Betrachtung der Möglichkeiten von UHPC, selbst feinste Strukturen detailgetreu abzuformen und so Präzisionsfertigteile herstellen zu können – wie sie in Henzes Dissertation zu Fachwerkträgern aus Hochleistungsbeton [49] und zur Herstellung der Wildbrücke aus UHPC in [6] benötigt wurden –, wird klar, dass die zurzeit zulässigen Toleranzabweichungen im Bauwesen für Betonteile und der dafür notwendigen Schalungen dem Potential neuer Betone und computerbasierter Planungs- und Fertigungsprozesse nicht gerecht werden und diese auch nicht unbedingt fördern. Zur Bewertung der mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie erreichten Präzision der Schalung und der damit hergestellten UHPC-Betonkörper werden daher die erreichten Allgmeintoleranzen des Maschinenbaus bzw. die erreichten Toleranzklassen nach DIN ISO 2768 in Abhängigkeit der geometrischen Form verwendet.

### 2.2.3 Schalungssysteme / Systemschalungen

Schalungssysteme oder Systemschalungen sind Schalungen mit aufeinander abgestimmten Bestandteilen (überwiegend aus Systemteilen) für unterschiedliche Anwendungen, die von verschiedenen Herstellern entwickelt und als in sich abgestimmtes System angeboten werden. Systemschalungen bieten dabei gegenüber der individuellen zimmermannsmäßigen Holzbauweise von Schalungen besonders für die Herstellung von ebenen Bauteilen durch das Zusammenwirken der einzelnen Systemteile die folgenden Vorteile:

- Die einzelnen Systemteile können als Norm- und Serienprodukte in großer Stückzahl und mit geringsten Maßabweichungen in einem hoch automatisierten industriellen Produktionsprozess im Werk hergestellt werden.
- Durch die Modularität und vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten bieten die Systemteile eine hohe Variabilität und Flexibilität im Schalungsbau.
- Einzelne Systemteile können mehrfach, auch bei sich ändernden Bauteilgeometrien durch neue Kombinationen, eingesetzt und somit häufiger auch auf verschiedenen Baustellen wiederverwendet werden (Reduzierung der Abschreibungskosten).
- Bei Beschädigung können einzelne Systemteile einfach ausgetauscht oder repariert werden.

Als reine Systemschalungen kommen heute hauptsächlich die Typen Rahmen- und Trägerschalung, vornehmlich für Decken-, Wand- und Stützenschalungen, zum Einsatz. Wie bereits einleitend erwähnt, liegt der größte Nachteil bei diesen Systemschalungen darin begründet, dass basierend auf ihren Systemteilen lediglich ebene und eckige, ggf. bei Trägerschalungen noch unidirektional gekrümmte Bauteilgeometrien, hergestellt werden können. Für die Herstellung von geometrisch komplexen freigeformten Betonbauteilen (3D Freiformflächen) mit starken uni- und multidirektional gekrümmten und / oder strukturierten Oberflächen sind Systemschalungen kaum noch anwendbar, weswegen hier sogenannte Sonderschalungen zum Einsatz kommen.

**Rahmenschalungen oder auch Rahmentafeln** sind heute das am meisten verwendete Schalungssystem zur Herstellung ebener Betonbauteile wie Stützen, Wände und Decken. Im Gegensatz zu Trägerschalungen bestehen sie, wie beispielhaft in Abbildung 2-9 dargestellt, aus weniger Einzelbauteilen mit werkseitig fest gefügtem Rahmen und einer fest montierten selbsttragenden Schalhaut. Rahmenschalungen sind in unterschiedlichen Element- bzw. Rastergrößen erhältlich und teilen sich dabei in die drei Klassen schwer (Elementgröße bis 8 m<sup>2</sup>, Höhe bis 3,3 m), leicht (Elementgröße bis 2,5 m<sup>2</sup>, Höhe bis 2,7 m) und kleinflächig (Elementgröße bis 1,35 m<sup>2</sup>, Höhe bis 2,5 m), wobei das heutige Konstruktionsprinzip auch für Sonderrahmenschalungselemente (z. B. Stirnabschalungen, Gelenk- und ECKelemente) nahezu immer gleichbleibend ist: Den Schalungsträger bildet ein umlaufender Rahmen aus Stahl-, Aluminium- oder Kunststoffhohlprofilen, in welchen Querrippen zur Aussteifung und Zwischenauflagerung der selbsttragenden Schalhaut befestigt sind. Der Rahmen erfüllt dabei vielfältige Aufgaben. Im Rahmen ist die selbsttragende Schalhaut flächenbündig zur Übertragung des Frischbetondrucks befestigt, mit Silikon egedichtet und so vor groben mechanischen Beanspruchungen an den Kanten geschützt. Durch Sicken in den Rahmenprofilen können die einzelnen Rahmenschalungselemente durch systemimmanente Rahmenverschlüsse wie z. B. Richtschlösser (Abbildung 2-9, rechts) oder auch Clips, Schnellspanner, Stoß- und Keilplatten zu größeren Elementverbünden zusammengefügt werden. Bei sich wiederholenden Bauteilgeometrien können so mehrere Rahmenschalungselemente gemeinsam als Verbund mittels Hebezeug umgesetzt und wiederverwendet werden. Je nach System bietet der Rahmen zudem vorgegebene Ankerhülssenpositionen, an welchen gegenüberstehende Elemente über Ankerstäbe (meist in Faserzementrohren) verbunden werden können, sowie Ösen zur Befestigung von ggf. notwendigen Gurtungen, Richtstützen, Arbeitsgerüsten und weiteren Systemteilen.

Begründet auf ihrem Konstruktionsprinzip besitzen die Rahmenschalungssysteme diverse Vorteile gegenüber anderen Schalungstechniken und -systemen: Basierend auf den festen Elementgrößen, der integrierten Schalhaut und den Systembauteilen für Verbindungen und Anschlüsse lassen sich im Rahmen des Rastermaßes schnell verfügbare, variabel einsetzbare, große und robuste Schalungen für unterschiedliche Bauteilgeometrien zusammenbauen. Durch die meist unkomplizierte Füge- und Systemlogik aller Bestandteile können die Elemente auch durch ungeschultes Personal fachgerecht montiert werden, sodass keine werkseitige Vormontage nötig ist und die Einzelemente platzsparend gelagert und transportiert werden können.

Trotz der enormen wirtschaftlichen Vorteile besitzen Rahmenschalungssysteme die folgenden Nachteile: Bei der Verwendung von systemimmanenten Rahmenschalungssystemen wird die Größe bzw. die Größenabstufung der Gesamtschalung und somit der herzustellenden Bauteilabmessungen durch das Rastermaß bestimmt, welches sich aus den Kombinationsmöglichkeiten der unterschiedlichen Rahmenschalungselementgrößen ergibt. Durch ihr Konstruktionsprinzip können selbst unter Zuhilfenahme von Sonderelementen wie z. B. Gelenkelementen ausschließlich ebene bzw. rechteckig / polygonalisierte Bauteilgeometrien hergestellt werden und das Fugenbild sowie die fixe Lage der Ankerstellen im Rahmen der einzelnen Elemente zeichnet sich auf der ausgeschalteten Betonoberfläche deutlich ab. Besonders bei der Herstellung hochwertiger Sichtbetonoberflächen kann das sich aufgrund von unterschiedlichen Elementgrößen, Ausgleichen und Aufstockungen ergebende Erscheinungsbild problematisch sein. In der Planung von Sichtbetonoberflächen sollten daher die unterschiedlichen Elementgrößen der jeweiligen Schalungshersteller entsprechend berücksichtigt werden.

Führende Anbieter von Rahmenschalungssystemen in Europa sind Doka, Peri, Ulma, Meva, Noe-Schaltechnik, Paschal, Mayer Schaltechnik, Harsco Infrastructure, Trinac, Wendler Schalung und Reber System-Schalung.



Abbildung 2-9: Rahmenschalung der Fa. Peri, Typ: DOMINO (links), LRS Richtschloss für bündige Elementverbindungen [50] (rechts)

**Trägerschalungen** werden heute hauptsächlich zum Schalen großer ebener Flächen im Industrie- und Ingenieurbau eingesetzt. Bei den in Abbildung 2-10 beispielhaft dargestellten Trägerschalungen der Firma Doka, Typ FF20, und der Firma Peri, Typ VARIO GT 24 Träger-Wandschalung bzw. der SKYTABLE Trägerschalung als Deckentisch, werden dabei als selbsttragende Schalungshäute 21 bis 24 mm starke Schalungsplatten (kunststoffbeschichtete Furniersperrholzplatten) auf den Schalungsträger geschraubt oder genagelt [27]. Als Schalungsträger kommen dabei je nach Frischbetondruck Holzträger im Maximalabstand von 0,4 m wie z. B. der GT 24 Gitterträger (Abbildung 2-10, links) oder VT 20K Vollwandträger (Abbildung 2-10, rechts, als Dreischichtsteg) sowie bei höheren

Anforderungen unterschiedliche Stahl- (Abbildung 2-11, links) und Aluminiumprofile zum Einsatz. Zusammengehalten werden die Schalungsträger dabei durch Gurtungen aus Stahl, welche zudem als Verankerungsebene für die Verbindungsmittel, Schalungsanker und Richtstützen dienen.

Trägerschalungen bieten den Vorteil, dass ihre Systemteile aus einfachen standardisierten Norm- und Serienprodukten gefertigt werden und sie so für unterschiedliche Bauprojekte nach Maß an nahezu jede ebene Bauteilgeometrie angepasst werden können. Zudem ist das System in der Lage, alle erdenklichen selbsttragenden Schalungshautfabrikate und im Besonderen auch -formate in unterschiedlichen Abmessungen aufzunehmen, wodurch Sichtbetonbauwerke mit hohen Anforderungen an Oberflächen, frei wählbaren Ankerpositionen (Ankerbild) und Schalungshautstößen realisiert werden können. Durch Wahl entsprechender flexibler, selbsttragender Schalungshäute können durch Anordnung von Spannschlössern an den Schalungsträgern unidirektional gekrümmte Bauteilgeometrien realisiert werden. Beispielhaft sind in Abbildung 2-11 die Trägerschalungssysteme der Fa. Peri, Typ: RUNDFLEX Plus und Gelenkriegel-Rundschalung GRV, dargestellt, welche die Herstellung unidirektional gekrümmter Bauteilgeometrien wie z. B. von Beton-Behältern ermöglichen. Nachteilig ist, dass Trägerschalungen ein hohes Maß an technischem Wissen und Zeit bei ihrer Planung und Montage benötigen.

Führende Anbieter in Europa von Trägerschalungssystemen und ihrer Systemteile sind Doka, Peri, Meva, Noe-Schaltechnik, Paschal, Ulma, Mayer Schaltechnik, Harsco Infrastructure, Trinac und Enders Schaltechnik.

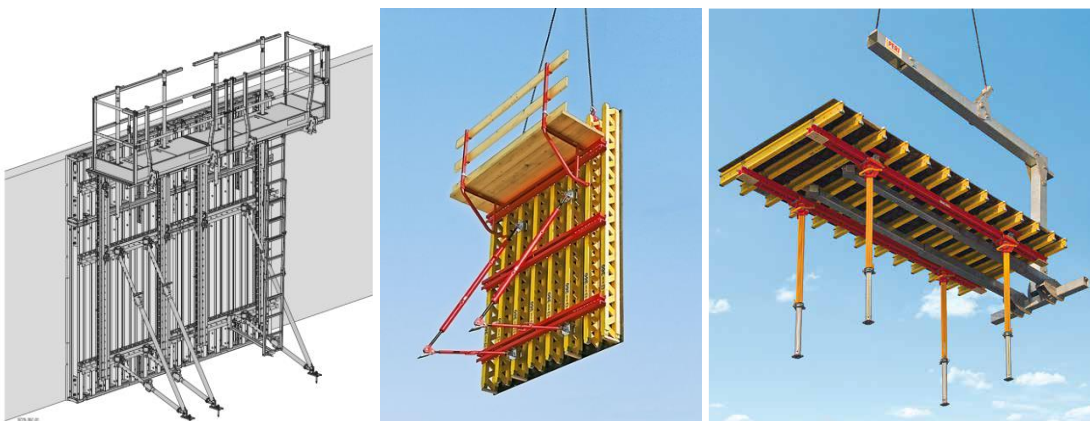


Abbildung 2-10: Trägerschalung: der Fa. Doka, Typ FF20 (links), Fa. Peri, Typ VARIO GT 24 Träger-Wandschalung (Mitte), Fa. Peri, Typ SKYTABLE Trägerschalung als Deckentisch (rechts) [50]

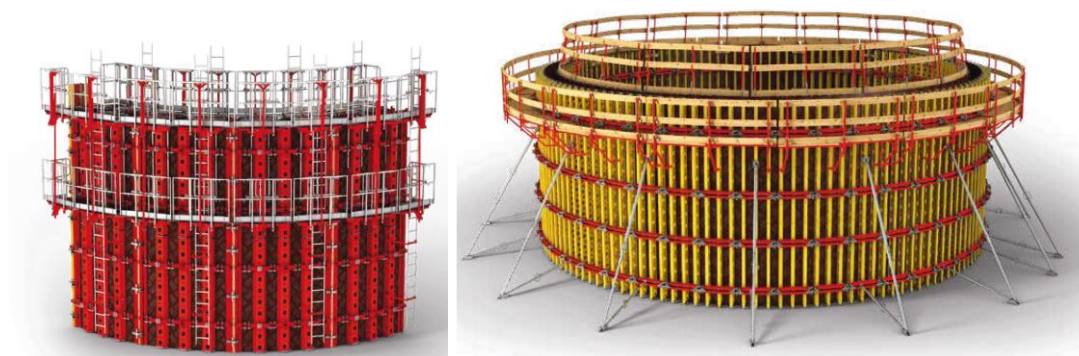


Abbildung 2-11: Trägerschalungssystem für unidirektionale Krümmungen Fa. Peri: Typ: RUNDFLEX Plus Rundschalung, Radien ab 2,50 m Durchmesser (links), Typ: GRV Gelenkriegel Rundschalung, Radien ab 0,9 m Durchmesser (rechts) [50]

### 2.2.4 Sonderschalungen und geometrieabhängige Kategorisierung

Für die Herstellung von geometrisch komplexen freigeformten Betonbauteilen (3D Freiformflächen) mit starken multidirektional gekrümmten und / oder strukturierten Oberflächen, wie diese heute vornehmlich im Bereich des Kulturbaus, bei besonders repräsentativen Gebäuden mit außergewöhnlichen Bauwerksformen oder technischen Ingenieurbauwerken (z. B. strömungstechnisch optimierten Wasserbauwerken) zu finden sind, können standardisierte Systemschalungen (wie z. B. Rahmen- und Trägerschalungen) kaum oder nur bedingt angewendet werden. Beispielhaft ist hier die digital entworfene „Freiform-Beton-Architektur“ von u. a. Frank O. Gehry oder Zaha Hadid zu nennen, welche eine extrem hohe geometrische Komplexität und Formenvielfalt mit fließenden, gerundeten oder auch biologischen Formen aufweist, die sich zumeist nur noch unter Zuhilfenahme von dreidimensionalen CAD Zeichnungen eindeutig beschreiben lässt. Zur Herstellung dieser Formen in Beton kommen daher sogenannte Sonderschalungen zum Einsatz. **Sonderschalungen werden im Rahmen dieser Arbeit definiert** als: projekt- bzw. geometrieabhängige Schalungen, die zur Erfüllung spezieller Anforderungen und meist nur für den Einsatz auf einer Baustelle bzw. zur Herstellung eines bestimmten, meist geometrisch komplexen, freigeformten Betonbauteils geplant, konstruiert, hergestellt und verwendet werden. Durch die hohen Herstellungskosten und die geometriebedingten geringen Einsatzzahlen werden objektbezogene Sonderschalungen heute aus wirtschaftlichen Gründen möglichst mit Systemschalungen kombiniert und nur dann verwendet, wenn der reine Einsatz von Systemschalungen technisch nicht oder nur bedingt möglich ist. Die Grenze zwischen System- und Sonderschalungselementen ist daher fließend, da diese je nach geometrischer und technischer Anforderung sowie Wirtschaftlichkeit im Grunde frei kombinierbar sind [27].

Im Gegensatz zu den Systemschalungen wie z. B. Rahmen- und Trägerschalungen sind die auf dem Markt angebotenen Typen von Sonderschalungen der verschiedenen Hersteller überaus unterschiedlich:

Die herkömmliche Herstellung von freigeformten Sonderschalungen als einfache, „klassische“ zimmermannsmäßige Bretterschalungen oder Stahlschweißkonstruktionen ist dabei bis heute durch einen hohen manuellen Arbeitsanteil geprägt, der zwar relativ niedrige Kosten ermöglicht, dafür aber in seinen Formen und Oberflächenqualitäten eingeschränkt ist. Im semi-manuellen und vollautomatischen Bereich der Sonderschalungsherstellung, wie unter anderem von Polonyi et al. in [24] und von Osterle et al. in [51] beschrieben, werden heute für die Herstellung von Sonderschalungen in Abhängigkeit der herzustellenden geometrischen Komplexität der Form hauptsächlich zwei unterschiedliche Prinzipien angewendet.

Im ersten Prinzip – für Bauteilgeometrien mit schwachen bis starken Krümmungen (Krümmungsradien über 1,5 m) – kommen vornehmlich speziell zugeschnittene flexible Holz-Schalungsplatten zum Einsatz, die auf CNC gefrästen Formknaggen aus Holz montiert werden. Beispielhaft können hier das Rolex Learning Center in Lausanne [52] und das Mercedes Benz Museum in Stuttgart [53] genannt werden. Im zweiten Prinzip – für komplexe Bauteilgeometrien mit sehr starken Krümmungen (Krümmungsradien unter 1,5 m) und Gittern – werden dagegen vornehmlich CNC gefräste Holz- oder beschichtete Polyurethan (PU) / expandiertes Polystyrol (EPS)-Schalungen eingesetzt. Beispielhaft können hier die Baumstützen aus Beton im Betriebsrestaurant der Boehringer KG in Ingelheim [54] oder die organisch geformte Betondecke beim Städel-Museum in Frankfurt a. M. [55] genannt werden. Neben den auf dem Markt angebotenen Typen von Sonderschalungen, welche im Kapitel 2.3 – Stand der Technik im Sonderschalungsbau für freigeformte Betonbauteile detailliert dargestellt sind, bestehen auch im Bereich von Forschung und Wissenschaft vielfältige ältere und neue Ansätze zur Herstellung von Sonderschalungen im Betonbau. Diese sind im Kapitel 2.4 – Stand der Forschung im Sonderschalungsbau für freigeformte Betonbauteile detailliert dargestellt.

Aufgrund der Vielfältigkeit der angebotenen Sonderschalungen kann für die passende Auswahl einer geeigneten Sonderschalung bisher keine allgemeingültige Aussage getroffen werden, sondern es muss je nach Bauprojekt und dessen Rahmenbedingungen jeweils die entsprechend optimal passende Technik für die Bauaufgabe gefunden werden. Die Auswahl wird dabei von den Faktoren Material,-



Herstellungs- und Entsorgungskosten, Wiederverwendungsrate, erreichbare Oberflächengenauigkeit und -qualität (Sichtbetonklasse) und natürlich besonders stark von der herzustellenden geometrischen Komplexität der Formen beeinflusst. Da in technischer Hinsicht besonders die in Beton herzustellende geometrische Komplexität der Formen bzw. ihrer Teilflächen für die Auswahl eines geeigneten Sonderschalungssystems maßgebend ist, wurde im durch die EU geförderten TailorCrete Forschungsprojekt „New Industrial Technologies for Tailormade Concrete Structures at Mass Customized Prices“ (2009 bis 2014) [56] zu deren Unterteilung ein Kategorisierungs- und Bewertungsansatz eingeführt. Zur **geometrieabhängigen Kategorisierung** bzw. als maßgebender Parameter für eine Unterteilung freigeformter Flächen wurde dabei die maximale Krümmung bzw. ihr Kehrwert, also der minimale Krümmungsradius (KR) einer Fläche, verwendet. Wie in Abbildung 2-12 dargestellt, wird hierzu in der TailorCrete Arbeitsgruppe 2 „New formwork types“ der maßgebende Krümmungsradius einer Fläche oder Form in Metern ermittelt, um so die Form einer der folgenden vier Kategorien zuzuordnen:

Krümmungskategorien (KK) zur Kategorisierung von komplexen freigeformten Geometrien:

KK 1: Niedrige Krümmung:	$KR > 15 \text{ m}$
KK 2: Mittlere Krümmung:	$KR > 5 \text{ m} - 15 \text{ m}$
KK 3: Hohe Krümmung:	$KR > 1,5 \text{ m} - 5 \text{ m}$
KK 4: Sehr hohe Krümmung & Detaillierung:	$KR = 0,05 \text{ m} - 1,5 \text{ m}$

Liegt ein Krümmungsradius unter 0,05 m vor, wird sie als Textur oder zusammengesetzte Details (Detaillierung) aus z. B. scharfkantigen Flächen mit Graten, Nuten, Stegen und Zylindern definiert und der Krümmungskategorie 4 zugeordnet.

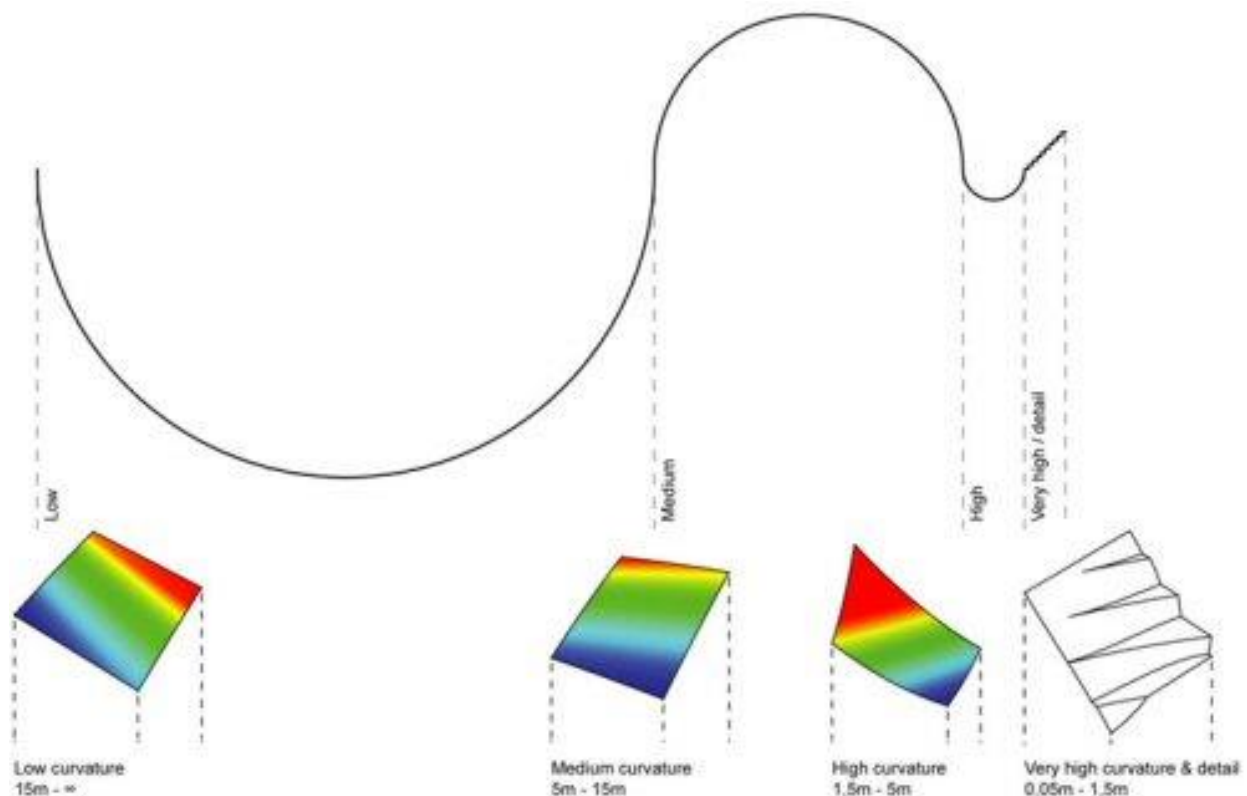


Abbildung 2-12: Kategorisierung unterschiedlicher Kurvenradien von Freiformbauteilen [56]

Anhand dieser vier Kategorien können Sonderschalungssysteme geometrieabhängig kategorisiert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für eine bestimmte Krümmungskategorie bewertet werden. Zusammen mit weiteren Bewertungskriterien, wie der erreichbaren Oberflächengüte, der Präzision des Betonkörpers und dem Kostenaufwand je m<sup>2</sup> Schaloberfläche für Planung, Herstellung, Transport, Auf- / Abbau, Instandhaltung und Entsorgung / Wiederaufbereitung, lässt sich somit eine Aussage darüber

treffen, ob ein bestimmtes Sonderschalungssystem für eine bestimmte geometrische Form technisch und wirtschaftlich geeignet ist. Auch wenn dieses Bewertungssystem in der Regel nur Richtwerte liefert, wird es im Rahmen dieser Arbeit dazu verwendet, die im Folgenden beschriebenen Sonderschalungssysteme des Standes der Technik und Wissenschaft vergleichen und hinsichtlich ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile bewerten zu können.

Dass sich die Krümmung bzw. der Krümmungsradius (KR) als maßgebender Parameter für eine Unterteilung von freigeformten Bauwerken und sogar deren Kategorisierung eignet, zeigen dabei die in [29] von Hickert / Knaack beschriebenen Untersuchungen. Bei der Analyse von 160 realisierten uni- oder multidirektional gekrümmten Betonbauten wurde dabei jeweils der maßgebend dominierende Krümmungsradius aus dem Spektrum der vorhandenen Radien bestimmt und dem Gebäude bzw. dem betrachteten Gebäudeteil zugeordnet. Wie in Abbildung 2-13 dargestellt, wird durch Hickert / Knaack dabei gezeigt, dass im freigeformten Betonbau zwar bevorzugte Gruppen von Krümmungsradien existieren, diese sich aber über das gesamte Krümmungsspektrum hin relativ gleichmäßig verteilen. Bezieht man diese ermittelten Krümmungsradien auf die Krümmungskategorien des TailorCrete Programms, wird deutlich, dass für alle Krümmungskategorien der Bedarf an geeigneten Sonderschalungssystemen besteht, welche auch in der Lage sein sollten, alle Krümmungsradien von Betonoberflächen herstellen zu können.

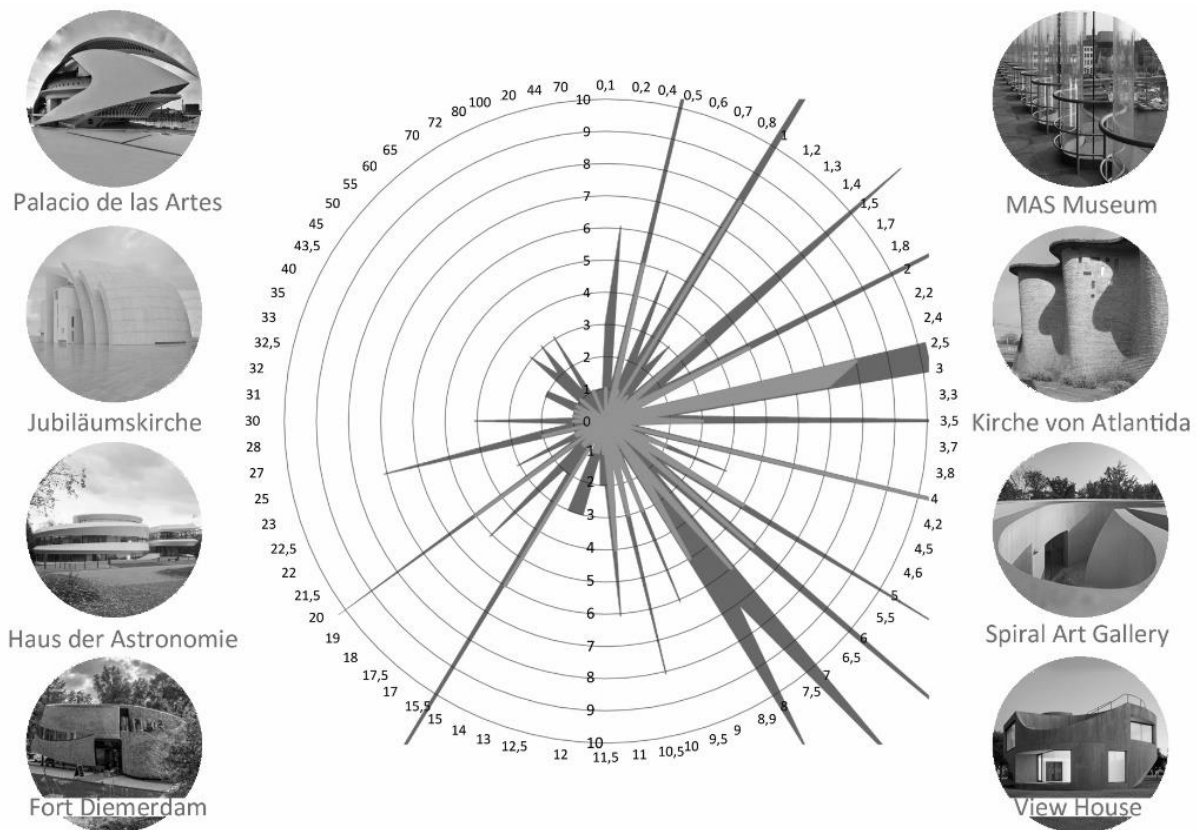


Abbildung 2-13: Radiales Summendiagramm des jeweils maßgebenden Krümmungsradius in Metern (Zahlen im Umfang des Kreisdiagramms) von 160 realisierten uni- oder multidirektional gekrümmten Betonbauten [29]



### 2.3 Stand der Technik im Sonderschalungsbau für freigeformte Betonbauteile

#### 2.3.1 Manuell hergestellte Sonderschalungen



Abbildung 2-14: Manuelle Fertigung von Sonderschalungen aus Holz: Brückenschalung Hünnebeck / Harsco [57] (links); Tunnelschalung Hubert & Sohn [58] (rechts)

Manuell hergestellte Sonderschalungen aus Holz bilden den Großteil der heute verwendeten Schalungen für freigeformte Betonkörper. Die im deutschen Raum bekanntesten Hersteller dieser konventionellen zimmermannsmäßigen Schalungen sind Harsco / Hünnebeck, Kiefer Schalungsbau, NOE Schaltechnik, Huber & Sohn, Arbloc und Enders Schaltechnik. Wie in Abbildung 2-14 beispielhaft dargestellt, bestehen diese Schalungen aus einem Schalungsträger aus Fachwerken oder Formknaggen und einer selbsttragenden Schalungshaut aus gebogenen Brettern oder Holzwerkstoffplatten. Basierend auf der Verformungsmöglichkeit der verwendeten selbsttragenden Schalungshaut können mit dieser Technik Schalungen für Betonbauteile mit einem minimalen Krümmungsradius von etwa 1,5 m (KK 1, 2 & 3) hergestellt werden. Die erreichbare Betonoberflächenqualität ist bei großen Krümmungsradien in Analogie zur Trägerschalung sehr hoch, da bei hohen Anforderungen als Schalhaut sehr glatte kunststoffbeschichtete Furniersperrholzplatten im gebogenen Zustand eingesetzt werden können. Die Herstellung von Schalungen mit einem geringeren Krümmungsradius (KK 4) ist dabei ebenfalls möglich, bedingt aber die Verwendung mehrerer dünner, übereinander angebrachter Schalungshautschichten oder nebeneinanderliegende maßgeschnittene Leisten in Analogie zum Bootsbau. Besonders bei feinen Detaillierungen bedarf es dabei höchster Akribie, handwerklichen Könnens und viel Erfahrungswissens des Tischlers mit einem besonders hohen manuellen und zeitlichen Aufwand zum Schleifen und Lackieren der Schalhautoberfläche. Da es sich bei der Herstellung dieser Schalungen um einen komplett manuellen Prozess handelt, müssen bei komplexen Geometrien die meist dreidimensionalen CAD Konstruktionspläne für die Herstellung in zweidimensionale Zeichnungen umgesetzt werden, was unweigerlich die erreichbare Präzision verringert, die dann nur durch punktuelles Vermessen und Nachbearbeiten wieder erhöht werden kann.

### 2.3.2 Semi-manuell hergestellte Sonderschalungen



Abbildung 2-15: Semi-manuelle Fertigung eines 3D-Schalelements der Firma Peri [58] für das Aquatics Centre in London [59]

Semi-manuell hergestellte Sonderschalungen wie die 3D Schalungskörper der deutschen Firma PERI besitzen zwar ein ähnliches Konstruktionsprinzip wie die manuellen zimmermannsmäßigen Sonderschalungen, alle Bauteile werden aber auf Basis von direkt aus den dreidimensionalen CAD Zeichnungen digital generierten Fertigungsdaten mittels CNC gesteuerten Zuschnitts hergestellt. Die so präzise zugeschnittenen Formknaggen und selbsttragenden Schalhäute aus Holzwerkstoffplatten werden anschließend manuell aus rechteckigen Sonderschalungselementen (bei Peri Formschalungsteile genannt) zusammengesetzt und verschraubt (Abbildung 2-15). Durch die hohe Präzision des Zuschnitts der Einzelteile erreichen auch die zusammengesetzten Sonderschalungselemente eine hohe Präzision. Eine hohe Passgenauigkeit der aus einzelnen Sonderschalungselementen zusammengefügte Gesamtschalung wird dabei durch im CNC Fertigungsprozess eingebrachte Einmesspunkte zur exakten Positionierung der Elemente untereinander und auf der Baustelle erreicht. Analog zum manuellen Formenbau wird auch hier die Formgebung bzw. die erreichbare Krümmung (KK 1, 2 & 3) durch die zu formende selbsttragende Schalhaut begrenzt. Bereiche mit einem geringeren Krümmungsradius (KK 4) können in diesem semi-manuellen Verfahren nur bedingt hergestellt werden (nur  $KR > 0,6$  m möglich). Die mit diesem Verfahren erreichbare Betonoberflächenqualität ist sehr hoch und wird dabei besonders durch die hohe Passgenauigkeit der CNC geschnittenen selbsttragenden Schalhäute im Stoßbereich begünstigt. Wie beim Aquatics Centre in London (Abbildung 2-15) auf Wunsch der Architektin Hadid ausgeführt, erlaubt der CNC Zuschnitt dabei auch eine exakt doppelte Ausführung der Schalhaut, sodass auf die erste verschraubte Schalhaut zur Vermeidung der Schraubenabdrücke im Betonbild eine exakt passende zweite Schalhaut geklebt werden konnte.

Der hohe Anteil an Automatisierung bei der Herstellung, die Modularisierung der Formschalungsteile und die Kombinierbarkeit mit standardisierten Systemschalungen führt dazu, dass diese semi-manuell hergestellten Sonderschalungen und besonders die Peri Formschalungsteile aktuell bei nur einfacher Verwendung die wirtschaftlichste auf dem Markt verfügbare Lösung zum Schalen von freigeformten Betonbauteilen der Krümmungskategorien 1, 2 & 3 zu sein scheinen.

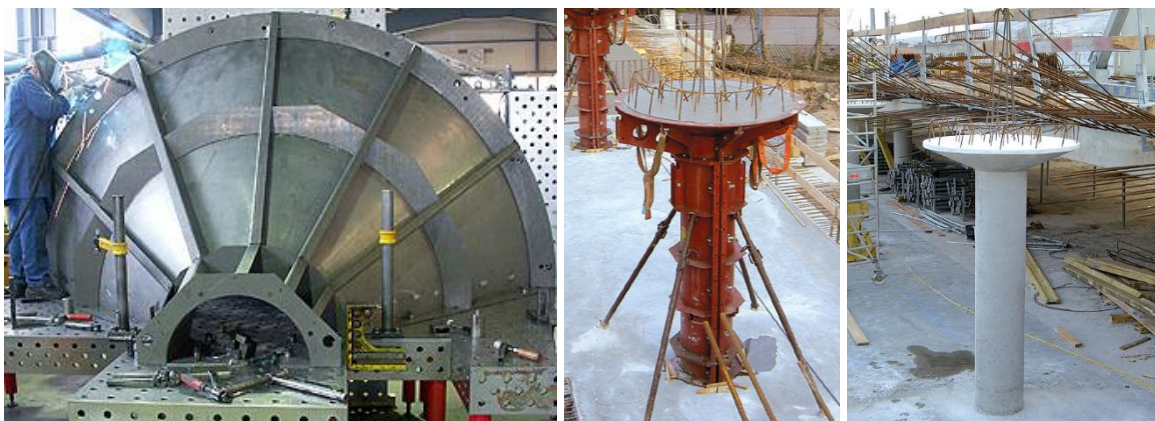


Abbildung 2-16: Herstellung einer Sonderstützen-Stahlschalung mit Pilzkopf der Firma Robusta-Gaukel [56] (links), zusammengesetzte Stahlschalung (Mitte), fertige Pilzkopfstütze eines Parkdecks in Mödling bei Wien (rechts) [56]

Bei sich wiederholenden freigeformten Bauteilgeometrien wie z. B. einer Pilzkopfstütze, bei welchen eine mehrfache Verwendung der Schalung gegeben ist, kommen semi-manuell hergestellte Sonderschalungen als Stahlschweißkonstruktion zum Einsatz. In Analogie zu den Holzwerkstoff-Formschalungsteilen der Firma Peri werden dabei die Bestandteile der Schalung aus Stahlblechen mittels CNC gesteuerten Zuschnitts hergestellt, anschließend manuell gebogen und zu den formgebenden Stahlschalungen verschweißt (Abbildung 2-16). Zur Vermeidung von Korrosion muss die gesamte Schalung am Ende des Herstellungsprozesses lackiert werden. Die erreichbare Betonoberflächenqualität und mögliche Formenvielfalt bzw. herstellbare Krümmungsradien sind dabei geringfügig höher als bei den Holzwerkstoff-Formschalungsteilen.

Der wesentliche Nachteil dieser Stahlschweißkonstruktionen besteht in den hohen Herstellungskosten, die sich erst bei einer etwa mindestens 10-fachen Verwendung der Schalung gegenüber den Holzwerkstoff-Formschalungsteilen amortisieren. Da sich freigeformte Geometrien im Bauwesen eher selten wiederholen, und wenn, dann nur als relativ simple Geometrien wie der Kegelstumpf einer Pilzkopfstütze, sind Stahlschalungen ebenfalls meist auf diese relativ simplen Geometrien begrenzt. Sie stellen daher eher eine Ausnahme im Bereich der Sonderschalungen dar, die vornehmlich in Beton-Fertigteilwerken genutzt wird.

### 2.3.3 Vollautomatisiert hergestellte CNC gefräste Sonderschalungen

Für geometrisch sehr komplexe Bauteilgeometrien mit starken Kurvaturen (Krümmungsradien der Krümmungskategorien bis einschließlich KK 4), Texturen und Detaillierungen werden heute hauptsächlich vollautomatisiert hergestellte CNC gefräste Sonderschalungen vornehmlich aus expandiertem Polystyrol (EPS), Polyurethan (PU) und Vollholz eingesetzt. Für das dreidimensionale CAD Volumenmodell eines herzustellenden Betonbauteils wird durch Anwendung einer 3D Booleschen Differenz<sup>3</sup> ein negatives Schalungsmodell im CAD erstellt. Für die daraus durch Teilung erstellten CAD Schalungselemente werden mit einem CAM Fräsprogramm Fertigungsdaten in Form von Fräspfaden berechnet. Diese Fertigungsdaten werden an eine CNC Fräse (z. B. Roboter mit Frässpindel) übergeben, welche die zu erstellende Geometrie aus einem Vollblockmaterial, dem Rohling oder Rohteil, subtraktiv durch Fräsen<sup>4</sup> bzw. durch Zerspanung von überschüssigem Material (oft bis zu 60 %) herausarbeitet.

Das CNC gesteuerte Fräsen, wie es bereits seit den 1970er Jahren in der Metallbearbeitung im Maschinenbau eingesetzt wird, stellt dabei heutzutage eine gründlich erforschte Technologie dar, bei der die Bandbreite der herstellbaren geometrischen Formen kaum begrenzt ist und welche sich durch ihre hohe Flexibilität auch für die Herstellung von kleinen Losgrößen und Einzelstücken eignet. Bezogen auf die Herstellung von Sonderschalungen kann mittels CNC Fräsen je nach Frässtrategie und Teilung der Schalungselemente ebenfalls nahezu jede geometrische Form als Schalung hergestellt werden, die zudem je nach Präzision der verwendeten CNC Fräsmaschine im Regelfall eine für das Bauwesen sehr hohe Präzision aufweist. Entscheidend bei diesem Herstellungsverfahren ist die Wahl des zu fräsenden Materials, da dieses je nach Materialkosten und seinen mechanischen Eigenschaften die Herstellungskosten des jeweiligen Sonderschalungselements und die damit erreichbare Oberflächengüte und Präzision des herzustellenden Betonkörpers bestimmt.

In technischer Hinsicht sind für CNC gefräste Sonderschalungen porenfreie Materialien wie Polyurethane oder Vollholz mit einer Dichte von etwa 700 – 1200 kg/m<sup>3</sup> und einem daraus resultierenden Elastizitätsmodul von mindestens 2000 MPa besonders geeignet. Durch die Porenfreiheit und Robustheit des Materials ist die gefräste Oberfläche sehr glatt und kann daher ohne

---

<sup>3</sup> Boolesche Differenz Operation: Von einem Volumenkörper werden andere Volumenkörper subtrahiert und so die Differenz gebildet.

<sup>4</sup> Fräsen stellt nach DIN 8580 [36] eine Untergruppe der Zerspanung dar, bei welcher einem Werkstück eine bestimmte geometrische Form gegeben wird, indem von Rohteilen überschüssiges Material auf mechanischem Weg durch ein Zerspanungswerkzeug mit geometrisch bestimmten Schneiden (z. B. einem Fräser) in Form von Spänen abgetrennt wird.



eine zusätzliche Beschichtung direkt als selbsttragende Schalhaut verwendet werden, mit welcher sich höchste Betonoberflächenqualitäten herstellen lassen. Da bei CNC gefrästen Schalungen das Schalungsmaterial ebenfalls die Funktion des Schalungsträgers zur Aufnahme des Frischbetondrucks beim Betonieren übernimmt, nimmt die Verformung der Schalung mit steigendem Elastizitätsmodul des Materials ab und somit die erreichbare Präzision des Betonbauteils zu.

Im Rahmen des DFG Forschungsvorhabens „Von der Bauteilföugung zu leichten Tragwerken: Hybride, trocken gefögte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC“, welches am ITE in Zusammenarbeit mit dem iMBB, Abteilung Baustoffe, der TU Braunschweig durchgeföhrt wurde (2011–2018), wurden u. a. CNC gefräste Sonderschalungen aus Polyurethan (Duroplaste) Typ obomodulan® [60] zur Herstellung von trocken geföigten Kassettendecken aus UHPC (Abbildung 2-17) verwendet [61]. Die erreichte Präzision der hiermit hergestellten UHPC Bauteile mit einer Maßtoleranz von  $\pm 0,05$  mm [62] zeigt dabei eindrucksvoll das Potential dieses Schalungsmaterials und der damit hergestellten UHPFRC Präzisionsfertigteile. Nachteilig bei der Verwendung von dichten Polyurethanen oder von Vollholz sind hingegen die hohen Materialkosten (4.000 bis 8.000 €/m<sup>3</sup>), das mit steigender Dichte des Materials sinkende Zeitspanvolumen (Vorschubgeschwindigkeit beim Fräsen) und die daraus resultierenden längeren Fräszeiten, welche sich zusammen in einem sehr hohen Herstellungskostenaufwand je m<sup>2</sup> niederschlagen.



Abbildung 2-17: CNC gefrästes Sonderschalungsteil aus Polyurethan Typ obomodulan® mit einer Dichte von 700 kg/m<sup>3</sup> (links); mit der Sonderschalung hergestelltes hochpräzises UHPC Bauteil einer Kassettendecke beim Ausschalen (rechts) [61]

Aufgrund dieser hohen Kosten wird heute in der Bauwirtschaft für vollautomatisiert hergestellte CNC gefräste Sonderschalungen meistens das deutlich günstigere und sehr schnell zu fräsende expandierte Polystyrol (EPS) in unterschiedlichen Dichten von 30 kg/m<sup>3</sup> bei 60 €/m<sup>3</sup> bis etwa 60 kg/m<sup>3</sup> bei 130 €/m<sup>3</sup> als Schalungsmaterial eingesetzt. Obwohl EPS durch seine geringe Dichte relativ leicht zu transportieren und schnell zu fräsen ist, stellt der geringe Elastizitätsmodul (EPS 30: 2 MPa bis EPS 60: 4 MPa) einen Nachteil dar. Durch den unterschiedlich hohen Frischbetondruck beim Betonieren wird das als Schalungsträger dienende EPS gestaucht und verformt so die dadurch gestöztzte Schalhaut und den herzustellenden Betonkörper. Besonders unregelmäßig ist diese Verformung bei unterschiedlichen EPS Dicken oder wenn der EPS Schalungsträger mit unterstützenden steiferen Traggerüstkonstruktion z. B. aus Holz, wie diese in Abbildung 2-18 rechts dargestellt, ausgefacht wird.

Deutlich wird dieses Phänomen besonders am Versatz im Stoßbereich der EPS Sonderschalungselemente, bei welchen die einzelnen unterschiedlich starken EPS Schalungselemente nicht untereinander schubfest verbunden sind, wie dieses bei der Herstellung des Demonstrators des Danisch Technological Institute (DTI) / Paschal Dänemark im TaylorCrete Programm zu sehen ist (Abbildung 2-18, links und Mitte). Bei dieser Machbarkeitsstudie wurde versucht, die ansonsten verwendete Kunststoffbeschichtung aus GFK der EPS Schalungsteile durch die Verwendung einer flexiblen und wiederverwendbaren Gummihaut zu ersetzen, um so das sehr aufwendige Recycling [63] des EPS durch Sortenreinheit überhaupt zu ermöglichen. Bei der bisher üblichen Nutzung von Beschichtungen ist diese Sortenreinheit von EPS nicht gegeben und ein Recycling nicht möglich.



Abbildung 2-18 Großdemonstrator des TailorCrete Projekts in Aarhus bei der Fa. Paschal Dänemark: Fertiges freigeformtes Demonstrationsobjekt aus Beton (links) [64], unzulässige Verformungen am Kontaktpunkt der unter dem Frischbetondruck verformten EPS Schalungskörper (Mitte) [65], System Doka Shape: GFK beschichtetes EPS montiert auf Holzträgerschalungen (rechts) [66]

Um den Versatz im Stoßbereich zu eliminieren und die aus Kostengründen in Kauf genommene allgemeine Verformung der EPS Sonderschalungselemente und somit hergestellten Betonbauteile auf ein akzeptables Maß zu reduzieren, werden die auf dem Markt erhältlichen EPS Schalungssysteme wie z. B. das System Doka Shape (Abbildung 2-18, rechts) mit einer verbindenden Oberflächenbeschichtung aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) versehen. Aufgrund der Offenporigkeit des EPS ist die Beschichtung zudem zum Erreichen einer glatten Betonoberflächenqualität mit hohen Sichtbetonanforderungen notwendig.

Wie in Abbildung 2-19 bei den durch die Firma Accentform hergestellten Sonderschalungselementen zur Herstellung der Decke des unterirdischen Ausstellungssaals des Städel-Museums in Frankfurt am Main zu sehen ist, wurde auf die Schalungskörper nach dem Fräsen ein ca. 5 mm starkes GFK-Laminat manuell aufgetragen und anschließend manuell geschliffen. Auf die insgesamt 195 unterschiedlichen Sonderschalungselemente aus 700 m<sup>3</sup> gefrästem EPS wurden dabei ca. 12.000 kg GFK aufgetragen. Neben GFK als Beschichtung wird auch teilweise Polyurethan im Spritzverfahren verwendet [67].

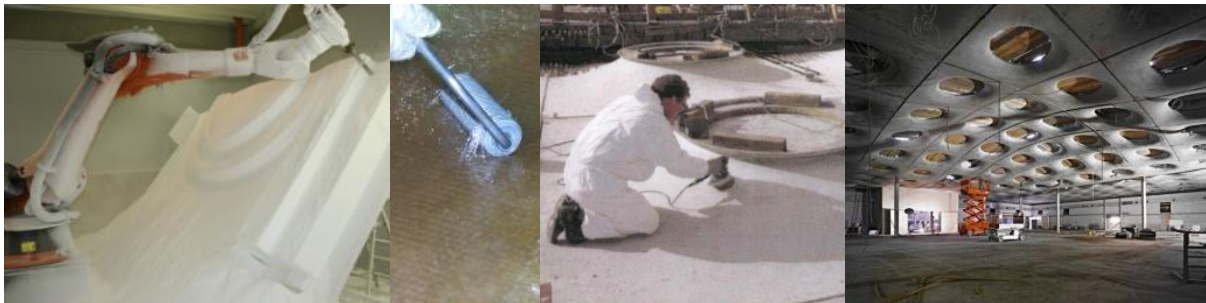


Abbildung 2-19: Städel-Museum in Frankfurt: Fräsen von EPS-Hartschaumblocken durch die Firma Accentform Kunststoffverarbeitung [59]; Beschichtung mit 5 mm dickem Glasfaser-Kunststoff-Laminat; manuelles Nachbearbeiten der Schalung Foto Kloft; fertige Decke des Museums Foto Norbert Miguletz (v.l.n.r.)

Trotz des im Nachgang erfolgten manuellen Aufwandes der Beschichtung, stellen Schalungen aus gefrästem EPS momentan das wirtschaftlichste auf dem Markt angebotene Verfahren für die Erstellung von hoch komplexen Betonbauteilen der KK 4 dar. Da es sich bei diesen Schalungen allerdings meistens um „Einwegschalungen“ mit nur einer oder wenig Verwendung handelt, sind sie aus ökologischer Sicht äußerst kritisch zu sehen, da sie aufgrund der Beschichtung nicht sortenrein recycelt werden können, sondern lediglich einer thermischen Verwertung bzw. Deponierung zugeführt werden können. Sonderschalungen dieses Typs für den Hochbau werden im deutschen Raum zwar von großen Schalungsherstellern wie Doka mit dem System Doka Shape angeboten, vornehmlich aber durch kleine Hersteller von Kunststoff- und Faserverbundprodukten hergestellt. Zu den Herstellern in Deutschland zählen unter anderem Accentform [68] oder Quepas Schalung [69]. Bemerkenswert ist das Dänische Start-up-Unternehmen ODICO Formwork Robotics [70], welches aus dem TailorCrete Projekt hervorgegangen ist und seit kurzer Zeit auf Regelflächen basierende, mittels robotisch geführten Heißdrahts hergestellte EPS Schalungskörper für den Hochbau kommerziell anbietet.

In einer weit höheren Masse als im Hochbau kommen freigeformte Sonderschalungen aus EPS heute bei der Herstellung von Betonfertigteilen in Form von Schachtunterteilen für Schmutz- und



Abwasserkanäle nach DIN EN 1917 bzw. DIN V 4034-1 [71] zum Einsatz, bei welchen die Form des Unterteils jeweils in Abhängigkeit der benötigten Gerinne und Rohranschlüsse variiert (Losgröße 1). Wurden die Schachtunterteile bisher meist aufwendig händisch gemauert und verklankert, können diese heute durch die Verfügbarkeit von hoch säure- bzw. sulfatbeständigen Betonen mithilfe entsprechender Sonderschalungen monolithisch gegossen werden. Die Sonderschalungen werden dabei, wie bei dem durch die Firma B+S Peco-System aus Rheine entwickelten und bereits mehrfach verkauften System, mit einem CNC gesteuerten Fräsroboter aus EPS PS40 Vollblöcken individuell herausgefräst (Abbildung 2-20, links), anschließend manuell nachgeschliffen (Abbildung 2-20, rechts) und vor dem Betonieren mit einem Trennmittel (Abbildung 2-21, links) beschichtet. Zwar treten auch hier im Betongussprozess Verformungen durch den geringen Elastizitätsmodul des verwendeten EPS auf, diese sind aber aufgrund des geringen Frischbetondrucks vernachlässigbar klein. Zudem werden für die Anschlussstellen der jeweiligen Rohrleitungen und Schachtringe hochpräzise Stahlschalungselemente verwendet, die wiederverwendbar sind, kaum Verformungen zulassen und somit Präzision dort liefern, wo diese am Bauteil benötigt wird.



Abbildung 2-20: Herstellung monolithischer Abwasser-Schachtunterteile: CNC gesteuertes Fräsen der Schalungskörper aus EPS mit dem System der B+S Peco-System (links), manuelles Nachschleifen der Oberfläche (rechts) © Fotos: H. Kloft



Abbildung 2-21: Herstellung monolithischer Abwasser-Schachtunterteile: Beschichten der gefrästen EPS Schalungskörper mit dem Trennmittel Betopro® WX-G (links), nach dem Abbinden der Schachtunterteile muss die EPS „Einwegschalung“ als Abfall entsorgt werden (rechts) © Fotos: H. Kloft

Obwohl das System in technischer Hinsicht hervorragende Ergebnisse liefert und zudem durch die kurze Herstellungszeit von nur etwa 20 Minuten etwa 80 EPS Sonderschalungen und somit entsprechende individuelle Schachtunterteile binnen 24 h im Dreischichtbetrieb hergestellt werden können, zeigt das System besonders gut die ökologische Problematik von gefrästen Schalungen aus EPS im Masseneinsatz. Durch den Verbrauch von täglich etwa 40 m<sup>3</sup> EPS PS40 fallen allein in dieser einen Produktionsstraße durch das Fräsen (Abbildung 2-20, links) und durch die Zerstörung der Schalung beim Entschalen (Abbildung 2-21, rechts) 1.600 kg EPS Abfall an, welcher wegen des Trennmittels nicht recycelt werden kann und somit mit stetig steigenden Kosten entsorgt werden muss.

### 2.3.4 Sonderschalungen als Abformung (Matrize) eines bestehenden Modells

Für die Serienherstellung von komplexen freigeformten Bauteilgeometrien aus Beton (alle Krümmungskategorien, feinste Texturen und Detaillierungen) werden heute flexible Formen, sogenannte Matrizen (engl. Wetcast), verwendet. Hierbei wird von einer bestehenden geometrischen Positivform oder einem originalen Modell ein Abguss oder Abdruck aus Silikon, Polyurethanen oder Epoxidharzen erstellt, welches die Matrizen bildet und somit das Negativ der Außenform für das herzustellende Bauteil darstellt. Da die Abformmassen relativ teuer sind (etwa 40 €/l) und immer ein aufwendiges Positiv der herzustellenden Form benötigt wird, wird dieses Verfahren im Betonbau im größeren Maße nur zur Oberflächengestaltung von sich wiederholenden Mustern auf oder von ebenen Flächen eingesetzt. Größere freigeformte Betonbauteile werden mit dem Verfahren aufgrund der hohen Kosten nur in Ausnahmefällen und absoluter technischer Notwendigkeit hergestellt. Diese beschränken sich meist auf die Reproduktion historischer Geometrien mit Hinterschnidungen wie Fresken, Stuck, Skulpturen oder z. B. für Wandverkleidungen von Prestigebauten wie dem „Cocoon Club“ des Frankfurter DJs Sven Väth (Abbildung 2-22). Die größten deutschen Lieferanten von Abformmassen und Hersteller von Matrizen sind KauPo, Reckli, NOE-Schaltechnik und WASA.

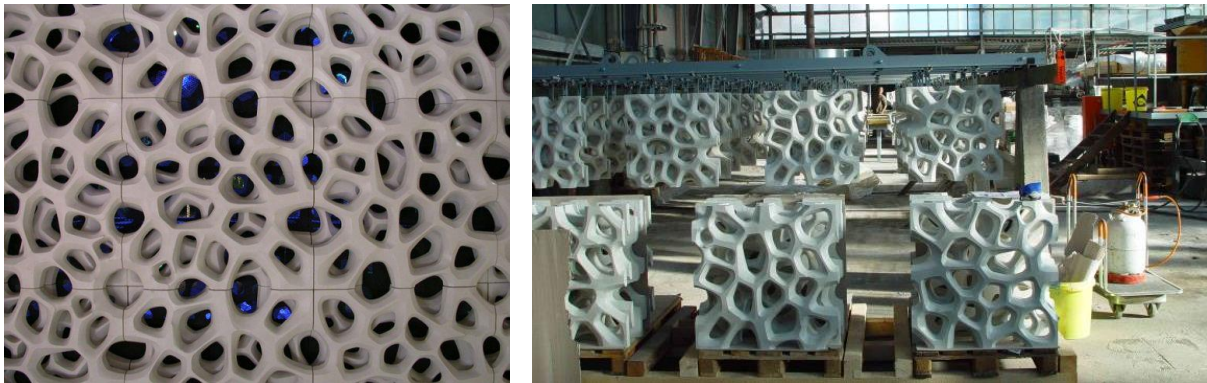


Abbildung 2-22: Elementierte organische Membranwand aus selbstverdichtendem Flow-Stone-Beton (Fa. Dyckerhoff) des Frankfurter „Cocoon Club“ (links), Serienfertigung der wenigen Grundmodule mittels Matrizen bei der Firma Villa Rocca (rechts), Entwurf 3deluxe Architekten / Tragwerksplanung OSD [72]



## 2.4 Stand der Forschung im Sonderschalungsbau für freigeformte Betonbauteile

Hat sich das Schalungshandwerk in den vergangenen Jahrzehnten in eine Schalungstechnik gewandelt [73], entwickelt sich diese in der aktuellen Zeit unter Betrachtung der diversen Forschungstätigkeiten besonders im Bereich des freigeformten Betonbaus hin zu einer Schalungstechnologie. Wie dieses für die Betontechnologie bereits zu einer Selbstverständlichkeit wurde, hält die Schalungstechnologie somit Einzug in die Lehre und Wissenschaft. Problematisch ist dabei, dass es sich bei der Schalungstechnologie nicht um eine eigene wissenschaftliche Disziplin handelt, sondern eher um ein jeweiliges Randgebiet der Disziplinen Architektur, Massivbau, Baubetrieb und Maschinenbau. Ebenso vielfältig wie diese Disziplinen sind daher auch die Forschungsansätze zur Entwicklung neuer Schalungstechniken oder sogar Schalungsmaschinen, die sich teilweise auf bestimmte Betonierverfahren, Geometrien (z. B. unterschiedliche Krümmungsradien) oder auch auf die Herstellung spezieller Betonbauteile beziehen. Um einen Überblick über diese vielfältigen älteren und neuen Ansätze als Stand der Forschung im Sonderschalungsbau (der Schalungstechnologie) für freigeformte Betonbauteile zu geben, werden daher im Folgenden einige ausgewählte Forschungsprojekte und Systeme beschrieben und bewertet.

### 2.4.1 Formbare Sonderschalungen

#### 2.4.1.1 Textile Schalungen (fabric formwork)

Textile Schalungen, im Englischen „fabric formwork“ genannt, stellen eine besondere Schalungstechnologie dar, welche zu verschiedenen geschichtlichen Zeitpunkten, meist in Zusammenhang mit Beton-Schalentragwerken, immer wieder in Technik und Forschung (weiter-) entwickelt und angewendet wurden und werden. Textile Schalungen werden dabei nach [74] als: „Schalung, die flexible Membrane / Textile für die strukturelle Unterstützung des Frischbetons verwendet“ definiert. Je nach Art des Schalungsträgers bzw. auf welche Art und Weise die textile, biegeeweiche und nicht selbsttragende Vorsatzschalungshaut gespannt wird, werden diese Schalungen in unterschiedliche Anwendungsarten unterteilt:

**Selbstspannend:** Das herzustellende Betonbauteil bzw. die in sich geschlossene textile Schalungshaut erhält ihre endgültige Form durch den hydrostatischen Druck des frischen Betons. Je nach Material, Zuschnitt, Vernähung und Fixierung des Textils können mit dieser Anwendungsart vornehmlich ausbeulende oder nach Kissen anmutende Formen hergestellt werden.

**Pneumatisch und mechanisch gespannt:** Die textile Schalungshaut wird an ihren Rändern entweder uni- bzw. bi-axial z. B. über Seilnetze mechanisch gespannt, oder die luftdichte und in sich geschlossene textile Schalungshaut wird mit einem unter Überdruck stehenden (Stütz-)Medium gefüllt und erhält so wie ein aufgeblasener Ballon ihre Spannung und Form. Durch Auftragen von Beton entsteht so ein Bauteil, welches seine endgültige Form durch einen Gleichgewichtszustand zwischen Membrankräften der Schalungshaut und Eigengewicht des frischen Betons erhält.

In ökonomischer und ökologischer Hinsicht stellen textile Schalungen aufgrund des geringen erforderlichen Materialeinsatzes besonders bei der Herstellung von Betonbauwerken mit Krümmungen, wie Schalen und Bögen, eigentlich ein Optimum dar, sodass z. B. mit pneumatisch gestützten Schalungen bereits ab 1942 weltweit über 1200 rotationssymmetrische Betonschalen [75] errichtet wurden. Äußerst problematisch ist bei dieser Schalungstechnologie einerseits das beschränkte herstellbare Formenspektrum, da ausschließlich gekrümmte Flächen der KK 1, 2 & 3 herstellbar sind, und andererseits die exakte Beherrschung und somit Maßhaltigkeit der endgültigen Betonform. Wie u.a. von Sobek [76] in seiner Dissertation in Bezug auf pneumatische Schalungen beschrieben, ist das Formenspektrum der herzustellenden Geometrie auf die pneumatische Bildbarkeit der Schalungsmembrane begrenzt und die notwendige Steuerung der Interaktion von Frischbeton und stützendem Luftdruck zur Kontrolle der Verformung ist äußerst komplex und nicht voll beherrschbar. Auch die an der TU Wien entwickelte „Pneumatic Wedge Methode“ [77] führte nicht dazu, dass sich

pneumatische vorgespannte Schalungen bis heute am Markt etablieren konnten. Ähnliches galt bisher für die Anwendungsarten der mechanisch gespannten textilen Schalungen. Trotz intensiver Forschungsarbeit der Forschergruppen in der International Society of Fabric Forming (ISOFF) [78] konnten die begrenzenden Faktoren des Formenspektrums und der Beherrschung der endgültigen Form nicht in einem zufriedenstellenden Maße für eine allgemeine Verbreitung der Technologie am Markt gelöst werden. Basierend auf dem Forschungsansatz der Block Research Group [79], den Gleichgewichtszustand mechanisch gespannter textiler Schalungen im Zusammenspiel mit dem Frischbetondruck exakt mittels Computern zu berechnen, könnte sich dieses ggf. zukünftig ändern. Der 2017 hergestellte Prototyp für ein ultra-dünnes und stark gewelltes Betondach der Block Research Group (Abbildung 2-23) zeigt eindrucksvoll, wie mit neuen Design- und Fabrikationsmethoden bekannte Technologien wie die mechanisch gespannten textilen Schalungshäute wiederaufleben können [80].



Abbildung 2-23: Prototyp für ein ultra-dünnes und stark gewelltes Betondach der Block Research Group unter der Leitung von Prof. Block und Dr. Tom Van Mele: Mechanisch gespanntes Drahtseil-Netz mit textiler Schalungshaut (links), Aufspritzen des Betons auf die mit Carbongewebe als Bewehrung versehene Schalung (Mitte), fertiges Betondach mit einer variierenden Betondicke von 3 cm an den Rändern und 12 Zentimetern an den Auflageflächen (rechts) [80]

### 2.4.1.2 CNC gesteuerte adaptive Schalungssysteme

Nach [81] basiert ein adaptives Schalungssystem auf im Raster nebeneinander angeordneten hydraulischen oder elektromechanischen Aktuatoren, die mit einer flexiblen und elastisch umformbaren Schalhaut verbunden sind. Die Hubglieder der Aktuatoren können CNC gesteuert jeweils einzeln ein- und ausgefahren werden und somit eine definierte Form in die Schalhaut einprägen.

Die Entwicklung adaptiver Schalungssysteme, wie das erste kommerziell als horizontaler Schaltisch ausgeführte System der Firma Adapa aus Dänemark [82], basiert dabei auf dem Wunsch, die Vorteile leicht verformbarer textiler Schalungen für die Herstellung von im CAD dreidimensional entworfenen gekrümmten Bauteilen zu übertragen. Wie in Abbildung 2-24 dargestellt, bieten adaptive Schalungen dabei den Vorteil, dass CAD Geometrien aus dem Computer direkt in reale Formen bzw. geformte Bauteile übertragen werden können. Die Schalung ist auch bei wechselnden Geometrien nahezu unbegrenzt wiederverwendbar, und so sind z. B. gegenüber konventionell gefrästen EPS Schalungen die Schalungseinsatzkosten deutlich geringer und Abfälle können im Produktionsprozess nahezu komplett vermieden werden. Zudem können mit den verwendeten Schalhautoberflächen aus Silikon hervorragende Oberflächengüten bei Betonbauteilen erreicht werden.

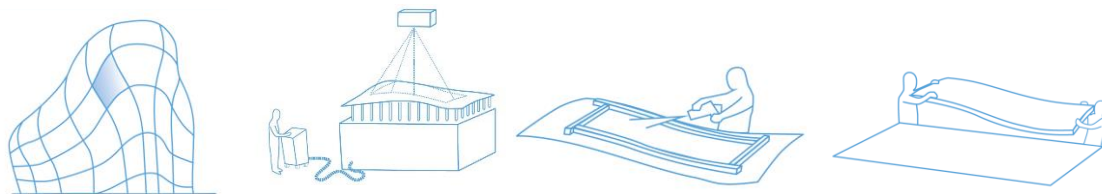


Abbildung 2-24: Arbeitsablauf adaptive Schalungen (Adaptive Mould™ Workflow) nach [82] in vier Schritten (v.l.n.r.): 1. Mittels Adapa Tools wird die gekrümmte CAD Form segmentiert und es werden die Steuerungsdaten für die adaptiven Schalungen generiert, 2. Die Hubglieder der Aktuatoren stellen die gewünschte Form der Schalhaut ein und über eine Laserprojektion wird die Position der anzubringenden Seiten-Abschalungselemente angezeigt, 3. Das Material wie z. B. glasfaserverstärkter Beton kann aufgespritzt oder -gegossen werden, 4. Nach Erhärten des Materials kann das gekrümmte Bauteil von der adaptiven Schalung genommen werden.

Bei adaptiven Schalungen ist das herstellbare Formenspektrum, ähnlich wie bei den textilen Schalungen, konstruktionsbedingt (Abbildung 2-25, links) auf rein gekrümmte Flächen beschränkt. Da die Funktionsweise der Umformung auf dem Prinzip von Interpolationsformen bzw. Spline-Kurven<sup>5</sup> basiert, bei der die Spline als Fasern der Fläche und die Aktuatoren als Stützpunkte verstanden werden, ist die exakte Krümmung der Fläche zudem nicht absolut frei wählbar, sondern steht in Abhängigkeit zur Steifigkeit und Elastizitätsgrenze der Schalhaut und zum Abstand der Stützpunkte zueinander. Gemäß Herstellerangaben erreicht das flexibelste System M400 Mould der Firma Adapa mit einer Maximalabmessung von 2 m x 3 m (B x L) und 0,9 m (H) einen maximalen Krümmungsradius von 0,4 m und erreicht somit die KK 1, 2 & 3 bzw. KK 4 nur teilweise. Kanten und Detaillierungen sind mit dem System nicht herstellbar und für die Ränder der herzustellenden Bauteile müssen zusätzliche Seiten-Abschalungselemente aufgesetzt werden (Abbildung 2-24, Punkt 3).

Die angegebene Herstellungstoleranz des Systems im Rahmen der herstellbaren Formen mit  $\pm 2,5$  mm ist für das Bauwesen als sehr gut anzusehen und entspricht nach DIN ISO 2768 Tab 1 der Klasse „grob“ (c). Beachtenswerte Forschung an diesen liegenden Systemen im Bezug zur Herstellung von doppelgekrümmten Betonfertigteilen wurde und wird u. a. an der TU Delft durch Schippert [83] geleistet. Obwohl für die liegenden Systeme eine Belastbarkeit von 375 kg/m (M400 Adapa), also eine mögliche auftragbare Frischbetondicke von bis zu 16 cm angegeben wird, stellen höhere Bauteildicken und somit notwendige höhere Seiten-Abschalungselemente durch den damit einhergehenden Anstieg ihrer Flächenträgheitsmodule ein Problem dar. Um diesem entgegenzuwirken und um sicherzustellen, dass die Seiten-Abschalungselemente weiter der gekrümmten Schalhaut folgen können, muss daher mit Anstieg der Höhe die Weichheit des Materials herabgesetzt werden. Dieses führt, wie auch in [83] beschrieben, zu größeren Verformungen oder sogar zum Ausbeulen der Seiten-Abschalungselemente, wodurch die ungewollten Verformungen an den Rändern der hergestellten Betonbauteile deutlich zunehmen. Um u. a. dieses Phänomen zu umgehen und auch größere, gekrümmte und vertikal hergestellte (Ort-)Betonbauteile wie Wände und Schalen herstellen zu können, wurde durch Knaack [81] ebenfalls im Rahmen des SPP 1542 DFG-geförderten Forschungsvorhabens eine vertikale, adaptive und zweischalig gekoppelte Betonschalung bis zur Konzeption entwickelt (Abbildung 2-25, rechts), bis dato aber noch nicht realisiert. Trotz der Verfügbarkeit kommerzieller adaptiver Schalungssysteme und diverser Forschungsprojekte in Bezug auf den Betonbau, werden in der Bauwirtschaft noch keine mit diesem Verfahren hergestellten Bauteile im großen Maße eingesetzt.



Abbildung 2-25: Aufbau des durch Adapa patentierten adaptiven Schalungssystems: Doppelmembrane aus Silikonverschleißschicht (2 mm) und Tragschicht aus verstärktem ferromagnetischem Silikon (15–20 mm), Unterstützungssystem aus Kohlenstoffstäben, Magneten und Aktuatoren (links) des adaptiven Schalungssystems Typ Adaptive M400 Mould Adapa (Mitte) [82], Computervisualisierung des Konzepts einer vertikalen adaptiven zweischalig gekoppelten Betonschalung von Knaack (rechts) [81]

<sup>5</sup> Spline-Kurven sind Funktionen, die über Stützpunkte (Knoten) stückweise aus Polynomen n-ten Grades zusammengesetzt sind.

### 2.4.1.3 Schalungen auf Basis von Wachsen

Eine alternative Anwendungsmöglichkeit zur Herstellung von freigeformten Betonbauteilen unter Verwendung eines adaptiven Schalungssystems zeigt das unter der Leitung von Gramazio und Kohler an der ETH Zürich im TailorCrete Programm der EU (2009–2014) [84] entwickelte und 2012 mit dem Global Holcim Innovationspreis ausgezeichnete Schalungsverfahren „Zero Waste Free-Form Formwork“. Wie von Oesterle et al. in [51] beschrieben und in Abbildung 2-26, links dargestellt, wird dabei auf einen CNC steuerbaren adaptiven Schalungstisch heißes, flüssiges Wachs gegossen, welches durch Erkalten die am Tisch eingestellte Form der Schalungshaut als Negativabguss konserviert. Die so geformten und einzeln hergestellten Wachsschalungselemente können im Folgenden zu größeren Elementverbünden zusammengesetzt und z. B. beidseitig in eine konventionelle Rahmenschalung zur Herstellung freigeformter vertikaler Betonwände eingesetzt werden (Abbildung 2-26, rechts). Hierdurch soll es u. a. möglich sein, freigeformte Betonbauteile in Ortbetonbauweise direkt auf der Baustelle zu fertigen. Nach dem Ausschalen des Betons kann das Wachs wieder eingeschmolzen und für die Erstellung neuer Wachsschalungselemente verwendet werden, sodass dieses System nahezu abfallfrei funktioniert und zudem die Investitionskosten des Wachses durch den mehrfachen Einsatz leicht amortisiert werden können.

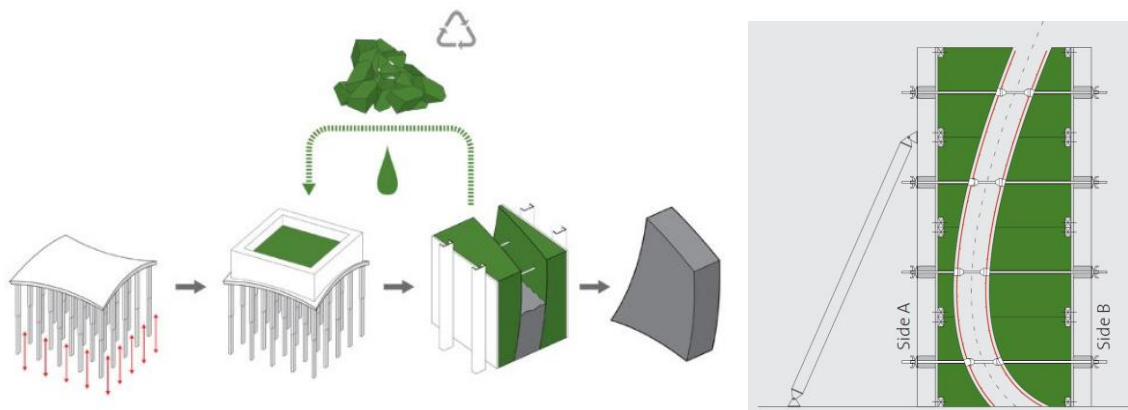


Abbildung 2-26: Prinzip des Prozessablaufes der wiederverwendbaren formgebenden Wachsschalung (Zero Waste Free-Form Formwork), welches unter der Leitung von Gramazio / Kohler an der ETH Zürich im TailorCrete Programm der EU (2009–2014) entwickelt wurde (links), Schema: zum Verbund zusammengesetzter Wachsschalungselemente, welche beidseitig in eine konventionelle Rahmenschalung zur Herstellung freigeformter vertikaler Betonwände eingesetzt sind (rechts) [84] © Gramazio / Kohler Research, ETH Zürich

Da das Wachs nur als (Über-)Trägermaterial der im adaptiven Schaltisch eingestellten Form dient, ist das herstellbare Formenspektrum dieses Schalungsverfahrens analog zu den adaptiven Schalungssystemen (vergl. 2.4.1.2) auf rein gekrümmte Flächen (KK 1, 2 & 3 bzw. teilweise KK 4) beschränkt. Die mit den gegossenen Wachselementen geschalteten Betonbauteile erreichen eine sehr hohe Oberflächengüte, da das Wachs hydrophob ist und im Erstarrungsprozess selbst eine sehr glatte Oberfläche bildet. Obwohl das Wachsschalungsverfahren von Gramazio / Kohler durch die Wiederverwendung des Wachses (Abfallfreiheit) ein enormes ökologisches Potential besitzt und bei den angegebenen Herstellungskosten von etwa 57 € je m<sup>2</sup> gekrümmter Schalungsoberfläche [56] auch in ökonomischer Sicht äußerst interessant ist, zeigen sich doch bei der Skalierung des Verfahrens von den ersten kleinmaßstäblichen Versuchen hin zur Herstellung großer Bauteile im Architekturmaßstab einige anscheinend ungelöste Probleme.

Wachse unterliegen naturgemäß einer starken temperaturabhängigen Volumenänderung, welche je nach Wachs bei etwa 5 bis 20 Vol. % im Bereich zwischen 20°C und der flüssigen Schmelze liegt. Im Abkühlprozess kontrahiert (schrumpft) das Wachs entsprechend ungleichmäßig und wirkt sich somit ungünstig auf die Maßhaltigkeit der Abformung aus. Um diesem entgegenzuwirken, wurde nach [51] das von Gramazio / Kohler verwendete Wachs der Fa. Paramelt Typ MACO zwar diesbezüglich optimiert, eine Rest-Kontraktion mit resultierenden Formänderungen konnte aber nicht vollständig verhindert werden.



Bei der Verwendung von adaptiven flexiblen Schalhäuten ist außerdem die hohe Wachsdicke der gegossenen Wachsschalungselemente problematisch, da diese die Präzision der Seiten-Abschalungen und somit Elementränder ungünstig beeinflussen (vergl. 2.4.1.2). Um eine ausreichend hohe, nahezu spaltlose Passgenauigkeit der Wachsschalungselemente untereinander zu erreichen, müssen die Ränder der gegossenen Wachsschalungselemente im Nachgang daher plangefräst werden (Abbildung 2-27, links). Zum einen bedeutet dieses einen zusätzlichen Arbeitsschritt und zum anderen ist das für dieses Verfahren verwendete Wachs hinsichtlich der Temperaturkontraktion und nicht für die Fräsbearbeitung optimiert. In am ITE durchgeführten CNC Fräsversuchen mit diesem Wachs zeigte sich ein ungünstiges klebrig-öliges Verhalten, welches zu einem unsauberen Fräsbild (Abbildung 2-27, Mitte) und zum schnellen Zusetzen des Fräswerkzeugs führte.

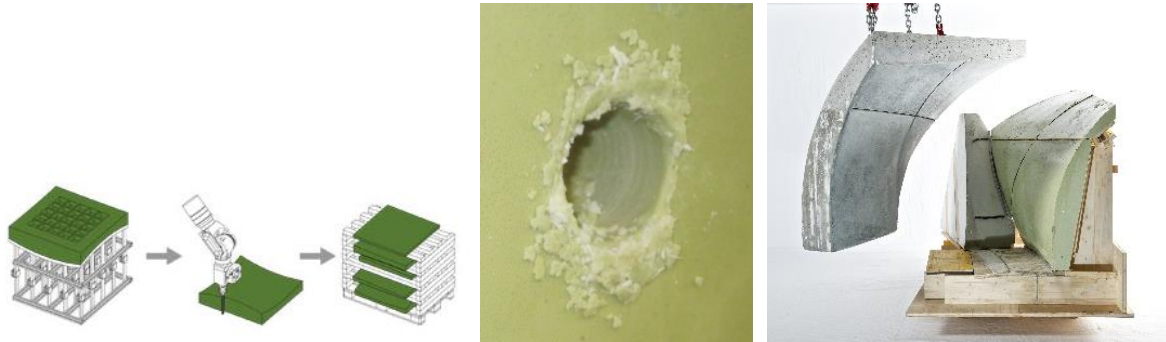


Abbildung 2-27: Optimierter Teil des Prozessablaufes zur Randbearbeitung durch CNC Fräsen (links) © Gramazio / Kohler Research, CNC Fräsversuche am Wachs der Fa. Paramelt Typ MACO, durchgeführt am ITE (Mitte), mit gefügten Wachsschalungselementen hergestelltes gekrümmtes Betonelement (rechts) © Gramazio / Kohler Research

Ebenfalls herausfordernd scheint das Erreichen einer exakten Füllmenge an flüssigem Wachs und somit einer exakt definierten Höhe der Wachselemente zu sein, sodass beim Zusammenfügen kein Höhenversatz zwischen den einzelnen Elementen auftritt. Wie u. a. in Abbildung 2-27, rechts zu sehen ist, wurde diese Herausforderung bei der Herstellung des dargestellten Betonelements einerseits durch eine jeweils entsprechend angepasste Unterfütterung der Wachsschalungselemente und andererseits durch die Anordnung von Schattenfugen zwischen den einzelnen Wachsschalungselementen gelöst.

In der Gesamtbetrachtung handelt es sich bei der „Zero Waste Free-form Formwork“ Schalungstechnologie von Gramazio / Kohler um einen prinzipiell sehr guten Ansatz, der ein großes Potential besitzt und der die hier vorliegende Arbeit stark inspiriert hat. Für viele der offenen Fragestellungen (wie z. B. im Wachs eingegossene Befestigungsblöcke und einen Verguss der Fugen zwischen den Wachsschalungselementen mit heißem Wachs) werden in der verfügbaren Literatur zwar Lösungskonzepte präsentiert, es ist allerdings nicht bekannt, ob diese Konzepte bzw. das ganze Verfahren bis zur industriellen Anwendbarkeit in der Bauwirtschaft weiterentwickelt wurde. Auch ist nicht bekannt, ob der ursprünglich geplante Demonstrator in Form eines Unterstandes aus freigeformtem Beton gebaut wurde.

### 2.4.1.4 Sandschalungen

Ein weiterer neuer Forschungsansatz für die Herstellung freigeformter Betonschalungen ist die Übertragung des traditionellen Sandgussverfahrens auf den Betonbau. Dieses Verfahren ist in der Metallgießerei seit Jahrhunderten gebräuchlich. Die Schalungshaut und der Schalungsträger bestehen dabei aus Formsand – einem Gemisch aus in der Regel feinem Quarzsand und einem Binder. Die im Folgenden kurz vorgestellten unterschiedlichen Forschungsansätze zur Übertragung dieser Technologie auf den Betonbau unterscheiden sich dabei maßgeblich in der Art, wie der Formsand in seine Form gebracht wird, und in der Art des verwendeten Binders (z. B. Ton, Öle, gefrorenes Wasser etc.). Es wird dabei allerdings nur auf nachhaltige Verfahren eingegangen, bei welchen der formende Sand wiederverwendet werden kann, da bei der Wahl von z. B. Kunstharzen als Binder ähnliche Probleme wie bei der Verwendung von gefrästem EPS auftreten.

Am ITE der TU Braunschweig wurden im Jahr 2015 zusammen mit Studierenden des Master Studiengangs Architektur im DBFStudio Seminar „scoop cast facade“ experimentell die Möglichkeiten von robotergestützt hergestellten freigeformten Schalungen auf Formsandbasis zur Herstellung modularer Beton-Fassadenpaneele untersucht. Wie in Abbildung 2-28 zu sehen ist, wurde dabei ein mit Stärke und Öl gebundener Formsand mithilfe eines UR5 Roboters bearbeitet und als einhäutige Schalung verwendet. Um auf eine Gegenschalung verzichten zu können, wurde die Rückseite der etwa 15 mm starken freigeformten Beton-Fassadenpaneele im Prozess durch den Roboter glattgestrichen. Die Ergebnisse des DBFStudio Seminars sind u. a. in [85] und [86] publiziert.



Abbildung 2-28: Scoop cast facade Masterseminar am ITE 2015: Projekt Floating Wall: Herstellung eines modularen Beton-Fassadenpaneels mithilfe eines experimentellen, robotergestützten Schalungssystems auf Formsandbasis; Prozessschritte: Der Roboter gräbt bzw. schiebt mit einem Spachtel das Negativ der herzustellenden Geometrie aus dem Sand (1.v.l.), mit einem pneumatischen Stampfer wird die Oberfläche der Sandschalung verdichtet (2.v.l.), nach Auftragen des Betons wird die Rückseite des Bauteils vom Roboter glattgestrichen und überflüssiges Material wird entfernt (3.v.l.), erhärtetes Beton-Fassadenpaneel (4.v.l.) © Fotos ITE

In einem Forschungsansatz von Gramazio / Kohler Research aus dem Jahr 2011, welcher auf der „Zero Waste Free-form Formwork“ Wachs-Schalungstechnologie aufbaut (vergl. 2.4.1.3), wird anstelle des adaptiven Schaltisches Formsand für die Formgebung der Wachsschalungselemente verwendet (Abbildung 2-29, links). Der Formsand wird dabei mittels eines Stampfers, welcher an einem Roboter befestigt ist, in Form gebracht (Abbildung 2-29, Mitte) und mit Wachs abgegossen (Abbildung 2-29, rechts). Um weiterhin eine komplette Abfallfreiheit des Verfahrens zu gewährleisten, wird als Binder, wie auch im Metallguss üblich, Öl eingesetzt, das es erlaubt, den Sand wie Plastilin (umgangssprachlich: Knete) für neue Formen wiederzuverwenden. Die mögliche Formenvielfalt ist dabei aufgrund des verwendeten Stampfprozesses auf rein gekrümmte Flächen beschränkt, so wie bei den adaptiven Schalungstischen.

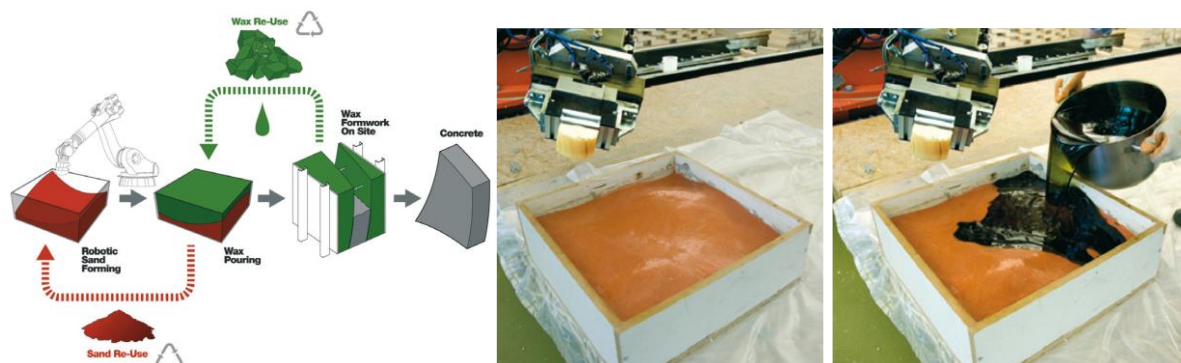


Abbildung 2-29: Auf robotisch geformtem Formsand basierender Prozessablauf der Wachsschalung (Zero Waste Free-form Formwork) von Gramazio und Kohler (links), mittels eines Stampfers, welcher an einem Roboter befestigt ist, in Form gebrachter Formsand (Mitte), Abguss des Formsandes mit Wachs (rechts) © Gramazio / Kohler Research [87]

In einem Forschungsprojekt von Grohmann an der Universität Kassel wurde dieser Ansatz von Gramazio / Kohler wieder aufgegriffen und für verschiedene Sande, Wachse und digitale Formgebungsprozesse untersucht. Wie in [88] beschrieben, hat sich als Optimum ebenfalls die Verwendung von ölgebundenem Formsand analog zum Metallguss herausgestellt, welcher allerdings zur Erweiterung der möglichen Formenvielfalt durch CNC Fräsen gepresster Sandblöcke in Form

gebracht wird. Durch das CNC Fräsen ist es somit möglich, gekrümmte Flächen aller KK (1 bis 4) sowie Texturen oder zusammengesetzte Details mit dem Verfahren zu erstellen. Scharfkantige Flächen mit Graten, Nuten und Stegen lassen sich mit diesem Verfahren allerdings nicht herstellen, da der Formsand in diesen Bereichen zum Abbrechen neigt.

Ebenfalls in einem durch die DFG im Rahmen des SPP 1542 geförderten Forschungsprojekts wurde an der Uni Stuttgart unter Sobek [89] die Entwicklung gefrorener Sandschalungen untersucht. Bei diesem Ansatz wird als Binder für den Formsand Wasser verwendet, welches über im Sand eingelegte Kühlleitungen gefroren wird. Die Formgebung erfolgt wie im Ansatz aus Kassel durch anschließendes CNC Fräsen des gefrorenen Sandes und bietet daher eine nahezu ähnlich mögliche Formenvielfalt. Die Stabilisierung des Sandes durch Gefrieren bietet dabei den Vorteil, dass die gefrorenen Sandschalungen direkt auch zum zweiseitigen Schalen des Betons verwendet werden können.

Die hier dargestellten Forschungsansätze sowie die experimentellen Untersuchungen am ITE zeigen, dass sich Formsande prinzipiell für die nachhaltige bzw. abfallfreie Herstellung von freigeformten Sonderschalungen eignen. Es ist allerdings nicht bekannt, ob sich diese Verfahren in der Bauwirtschaft etablieren konnten, was sich eventuell auf diverse ungelöste Herausforderungen, wie u. a. die folgenden, zurückführen lässt: Das robotische Stampfen des Formsandes zum Erreichen einer exakt in ihrer Position definierten Oberfläche ist aufgrund der schwer vorherbestimmbaren Verdichtung des Sandes extrem komplex und erfordert ein zumeist noch händisches Nachfüllen oder Entfernen von Sand im Prozess. Gleichermaßen gilt dies für das Fräsen des Formsandes, bei welchem die Fräser schnell verschleifen und sich das Entfernen durch automatisiertes Absaugen aufgrund der hohen Dichte des Formsandes als schwierig gestaltet. Bei nicht formstabilen Bindern wie Ölen können Sandschalungen nur liegend verwendet werden, da sie sich ansonsten bei Belastungen durch Stampfen, Rütteln oder den Frischbetondruck ungewollt verformen würden. Der Ansatz, Wachs als (Über-)Trägermaterial der Form bei ölgebundenen Sandschalungen zu verwenden, überbrückt zwar die Problematik der fehlenden Formstabilität, führt aber durch seinen thermischen Schwund im Abkühlprozess zu den bekannten ungewollten Verformungen und Maßabweichungen. Das energetisch sehr aufwendige Einfrieren des Sandes umgeht dieses Problem, der Kälteeinfluss der Schalung auf den Beton beim Abbinden wird aber als ungünstig für die Dauerhaftigkeit des hergestellten Betonbauteils angesehen und es bedarf ggf. einer zusätzlichen Isolierschicht. Zukünftig könnte vielleicht der Einsatz bzw. die Erforschung von formstabileren recycelbaren Bindern für Formsand, wie z. B. die in der Pharmaindustrie oftmals verwendete mikrokristalline Cellulose, diese Probleme lösen. Schlussendlich stellt sich noch die ästhetische Frage der Oberflächenglattheit. Auch bei Einsatz feinen Formsandes (und je nach eingesetztem Beton) verbleibt auf der geschalteten Betonoberfläche immer eine gewisse Rauigkeit, die ggf. einer Nachbearbeitung durch Schleifen bedarf.



### 2.4.2 Aktiv geführte Schalungen

Basierend auf der Gleitbauweise bzw. Gleitschalungsfertigung (engl. slipforming), bei der Beton in eine sich kontinuierlich bewegende Schalung gegossen wird, bestehen unterschiedliche Forschungsansätze, das Prinzip dieser Schalungstechnik zur Herstellung von freigeformten Betonbauteilen in einem digitalen Fertigungsprozess zu verwenden. Im Forschungsansatz von Gramazio / Kohler Research an der ETH Zürich von 2015 mit der Bezeichnung „Smart Dynamic Casting – Slipforming with Flexible Formwork (SDC)“ [90] können mithilfe einer kontinuierlichen, robotergeführten Schalung in Kombination mit einer aktiv steuerbaren flexiblen Schalungshaut freigeformte Betonstützen hergestellt werden. Hierbei wird die relativ kurze Schalung durch den Roboter in die Höhe gezogen und dabei kontinuierlich mit Beton gefüllt (Abbildung 2-30, 1. + 2. v. l.). Problematisch ist dabei, dass in Abhängigkeit der Erhärtung des Betons diese Schalung nur sehr langsam in die Höhe gezogen werden kann, wodurch dieses Herstellungsverfahren relativ zeitaufwendig ist. Beim „Dynamic Robotic Slip-form Casting“ (Abbildung 2-30, 3. v. l.) von Lei Yu, Dan Luo und Weiguo Xu, der mindestens durch die Arbeit von Gramazio / Kohler inspiriert zu sein scheint, wird ein mit Beton gefülltes Schalungs-Vierkantrohr durch einen Roboter nach oben gezogen und kann dabei verdreht werden. Dieser Prozess stellt zwar eine deutliche Vereinfachung der herstellbaren Stützgeometrien dar, ist aber mit nur rund 15 Minuten Fertigungszeit je Stütze deutlich schneller und lässt somit die Herstellung größerer Stückzahlen zu.



Abbildung 2-30: Smart Dynamic Casting (SDC) von Gramazio / Kohler Research an der ETH Zürich (1. + 2. v. l.) [91], Dynamic Robotic Slip-form Casting von Lei Yu, Dan Luo, Weiguo Xu an der Architecture School, Tsinghua University, Beijing China und damit realisiertes Projekt in China (3.+4. v. l.) [92]

Am ITE wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Generative Fertigung im Bauwesen“ als Kooperation von insgesamt sechs Instituten der Universitäten Braunschweig, Clausthal und Hannover und gefördert durch die Niedersächsischen Technischen Hochschulen (NTH) ein kooperierender Fertigungsprozess untersucht, bei welchem gegen eine robotisch aktiv geführte Schalung robotisch geführt Spritzbeton aufgetragen wird (Abbildung 2-31, links) [93]. Gegenüber dem reinen 3D Extrusions-Drucken von Beton oder dem sonst in diesem Forschungsprojekt angewendeten schalungslosen „Shotcrete 3D Printing“ (SC3DP) bietet dieser kooperative Fertigungsprozess zweier Roboter (Abbildung 2-31, rechts) den Vorteil, dass der Beton gegen die Schalung nahezu horizontal eingebracht werden kann und so u. a. eine Bewehrung in das Betonbauteil integriert werden kann. Zudem kann durch die aktiv geführte Schalung in situ die Oberfläche des Bauteils geglättet werden.



Abbildung 2-31: Computer Visualisierung der robotisch aktiv geführten Schalungen, gegen welche robotisch geführt Spritzbeton aufgetragen wird (links), Action Cam Bilder des dazu 2017 am DBFL des ITE durchgeführten Versuches (rechts) © ITE

### 2.4.3 Gedruckte Sonderschalungen

Digitale generative oder auch additive Fertigungsverfahren, zu denen auch das sogenannte 3D Drucken zählt, haben sich aufgrund ihres beeindruckenden ökonomischen und ökologischen Potentials bei der Herstellung von Produkten als Unikate in den vergangenen Jahren enorm weiterentwickelt. Diese, zunächst unter der Sammelbezeichnung „Rapid Prototyping“, bekannten und in [94] beschriebenen Verfahren lassen sich in Analogie zur DIN 8580 [36] in die drei folgenden Hauptkategorien unterteilen:

- Drucken aus einer Flüssigkeit (z. B. Stereolithografie – SDL)
- Drucken von Material im plastischen Zustand (z. B. Fused Deposition Modeling – FDM, Multi Jet Modeling – MjM, Auftragsschweißen, auch Wire Arc Additive Manufacture – WAAM)
- Drucken in einem Pulverbett / selektives Binden (z. B. selektives Lasersintern – SLS)

Während jedoch die additiven Fertigungsverfahren heute in vielen Bereichen der Produktion zum Stand der Technik gezählt werden können, wurde ihr Einsatz im Bauwesen bislang nur in wenigen Anwendungen und Forschungsprojekten thematisiert. Um dieses zu ändern und die Potentiale der additiven Fertigung auch für das Bauwesen nutzbar zu machen, befassen sich aktuell einige Forschungsprojekte damit, diese Verfahren weiterzuentwickeln, um so zukünftig komplexe freigeformte Betonbauteile direkt ohne jegliche Schalung herstellen bzw. drucken zu können. Beispielhaft sei hier das Forschungsprojekt „Additive Fertigung freigeformter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen“ von Lowke / Gehlen an der TU München [95], welches auf dem Prinzip des Pulverbettverfahrens / selektiven Bindens basiert, und das Forschungsprojekt „Entwicklung einer robotergestützten Spritztechnologie zur schalungslosen generativen Fertigung komplexer Betonbauteile, dem Shotcrete 3D Printing“ (SC3DP) von Kloft / Budelmann / Dröder et. al. [93], welches auf dem FDM Prinzip zum Drucken von Material im plastischen Zustand basiert (Abbildung 2-32), erwähnt.

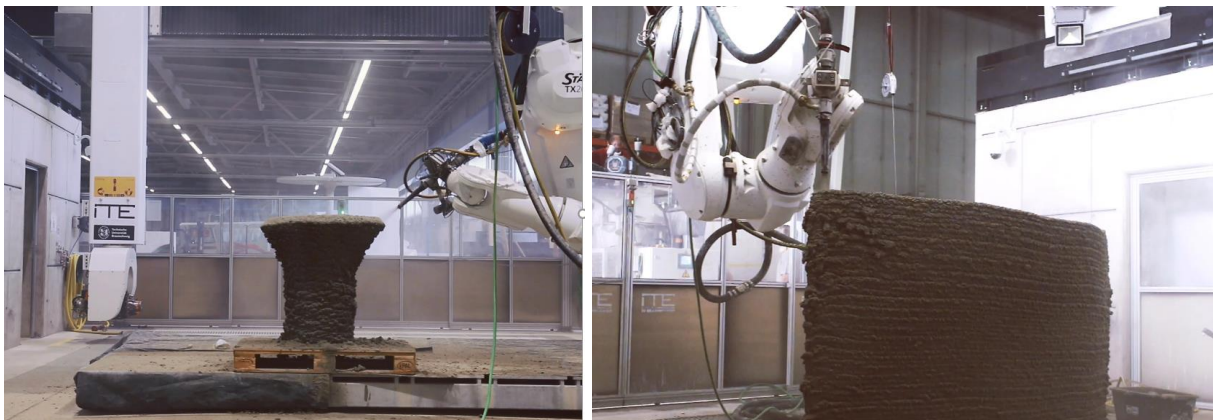


Abbildung 2-32: „Shotcrete 3D Printing“ (SC3DP) im Forschungsprojekt „Entwicklung einer robotergestützten Spritztechnologie zur schalungslosen generativen Fertigung komplexer Betonbauteile“ am DBFL des ITE: Druck einer Betonstütze mit Überhang (links), Druck einer gekrümmten Betonwand (rechts) © ITE

Trotz der bisher erreichten, bereits beeindruckenden Ergebnisse steht diese Forschung zur Herstellung schalungsloser freigeformter, „3D gedruckter“ Betonbauteile noch am Anfang. Damit diese Verfahren zukünftig einmal die Notwendigkeit von Schalungen im Betonbau überflüssig machen, sind noch diverse Herausforderungen, wie z. B. das Einbringen von Bewehrung, die Entwicklung geeigneter und kostengünstiger druckbarer Betone, die Herstellung glatter Oberflächen und eine höhere Produktionsgeschwindigkeit zum Erreichen einer hohen Effizienz, zu lösen. Bis diese Herausforderungen zufriedenstellend gelöst sind, werden Schalungen daher wohl bis auf weiteres ein essentieller Bestandteil des Betonbaues bleiben. Alternativ bieten die bestehenden additiven Fertigungsverfahren ein großes Potential für die Herstellung von freigeformten gedruckten Sonderschalungen.

### 2.4.3.1 Sonderschalungen aus FDM gedrucktem thermoplastischen Kunststoff

Im Rahmen des am ITE durchgeführten Forschungsprojektes „Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkselemente aus UHPC“ wurden bereits im Jahr 2013 Schalungen für die Herstellung von trocken gefügten UHPC Stoßverbindungen 3D gedruckt (Abbildung 2-33, 1.v.l.) [96]. Für eine Sonderschalung zur Aufweitung des Stoßbereiches einer UHPC Trockenstoßverbindung wurden Teile der unteren Schalung aus einem thermoplastischen Kunststoff mittels FDM gedruckt. Aufgrund der seinerzeit noch geringen Maßhaltigkeit des verfügbaren FDM 3D Druckers musste die Schalung allerdings aufwendig manuell nachbearbeitet werden, um die für den in Abbildung 2-33, 2.v.l. dargestellten UHPC Probekörper notwendige Präzision zu erreichen.

Im Jahr 2016/17 wurde am ITE der TU Braunschweig dieser Ansatz, aus thermoplastischen Kunststoffen FDM gedruckte Bauteile zur Herstellung freigeformter Schalungen zu verwenden, zusammen mit Studierenden des Master Studiengangs Architektur im Seminar „print cast“ wiederaufgenommen. Eine im Seminar durch Studierende digital entworfene und im Folgenden hergestellte kleinmaßstäbliche, komplexe Schalung und der damit hergestellte Betonkörper sind in Abbildung 2-33, 3.v.l dargestellt. Begünstigend wirken sich dabei im Vergleich zur Schalung von 2013 aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymeren (ABS) die Verwendung neu verfügbarer druckbarer Thermoplasten, wie z. B. dem organisch abbaubaren Polylactide (PLA) oder dem wasserlöslichen Polyvinylalkohol (PVAL oder PVOH), mit besseren mechanischen Eigenschaften und höherer Formstabilität im Druckprozess, und die deutlich höhere Präzision des verwendeten 3D Druckers aus.

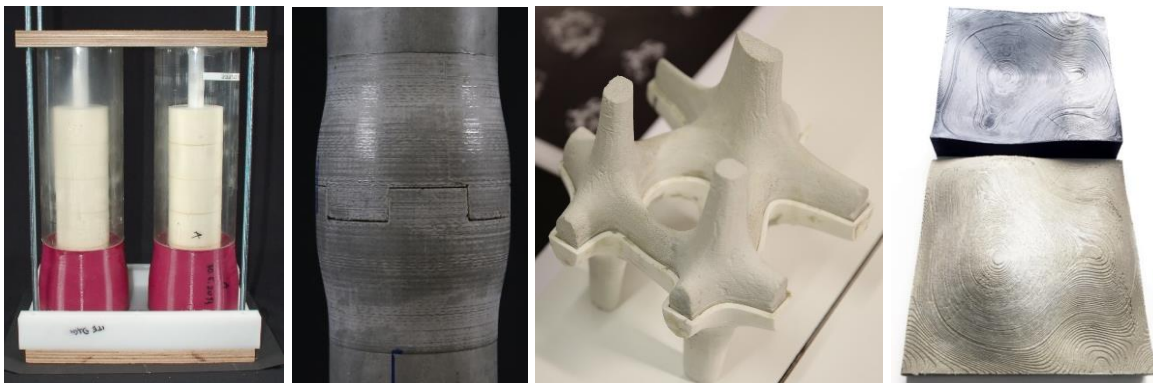


Abbildung 2-33: Zusammengesetzte Schalungen für Versuchskörper von aufgeweiteten, trocken gefügten, stabförmigen UHPC Stoßverbindungen einschl. unterer, mittels FDM gedruckter Aufweitung der Schalung (1.v.l.) [96], mit der Schalung hergestellter Probekörper aus UHPC (2.v.l.), im Seminar „print cast“ am ITE durch Studierende hergestellte kleinmaßstäbliche, komplexe Schalung und Betonkörper (3.v.l.), großflächige mit dem bigrapONE mittels 8 mm Düse FDM gedruckte freigeformte Sonderschalung (4.v.l. oberhalb.) Abguss aus UHPC (4.v.l. unterhalb.) © ITE

Diese kleinmaßstäblichen Beispiele zeigen dabei u. a. eindrucksvoll das Potential von gedruckten Schalungen, besonders hinsichtlich einer enorm großen geometrischen Freiheit, mit der sich in Beton nahezu jedes denkbare Formenspektrum aller KK, unterschiedlicher feingliedriger Texturen und sogar Hinterschnidungen herstellen lässt. Zwar existieren bereits realisierte Bauprojekte, wie bei der Sanierung einer Brauerei in Kempten, bei welcher durch die Firma Geiger GmbH mit FDM gedruckte Sonderschalungen der Firma BigRep [97] zur Herstellung von Betonfertigteilen eingesetzt wurden, ansonsten scheinen sich aber bisher großformatige FDM 3D gedruckte Sonderschalungen auf thermoplastischer Basis noch nicht in der Bauwirtschaft etabliert zu haben.

Hinderlich scheinen dabei unterschiedliche skalierungsbedingte Faktoren zu sein: Die Bauräume der auf dem Markt verfügbaren FDM 3D Drucker sind zwar in den vergangenen Jahren immer weiter gewachsen, der zurzeit größte bekannte kommerzielle FDM Drucker bigrapONE der Firma BigRep hat aber dennoch nur einen für den Maßstab des Betonbaus kleinen Bauraum von 1 x 1 x 1 m. Da das FDM Verfahren auf nur einer gleichzeitig arbeitenden Druckdüse basiert, nimmt die Druck- bzw. Produktionszeit mit sich vergrößernden Bauteilen exponentiell zu. Zwar kann durch Erweiterung der Druckdüse bzw. Vergrößerung des Durchmessers des im plastischen Zustand gedruckten thermoplastischen Strangs der Materialauftrag je Zeit erhöht werden, dieses führt aber unweigerlich zu größeren Oberflächen, wie bei dem am ITE entworfenen großflächigen freigeformten FDM 3D



gedruckten Sonderschalungselement und seinem Abguss aus UHPC in Abbildung 2-33, 4.v.l. zu sehen ist. Zudem ist diese Skalierbarkeit begrenzt, da ab einer gewissen Strangdicke während der Abkühlung des Materials innere thermisch bedingte Spannungen entstehen, welche den Verbund der einzelnen gedruckten Lagen untereinander negativ beeinträchtigen. Theoretisch könnte dies durch den Einsatz vieler parallel arbeitender Drucker (sogenannte Print Farmen) umgangen werden, die Fügung der einzelnen Schalungsteile sowie die aktuell noch sehr hohen Materialkosten von 2.000 €/m<sup>3</sup> (ABS) bis zu 7.000 €/m<sup>3</sup> (PLA) bleiben aber dennoch problematisch, da das Druckmaterial bisher zwar abbaubar, aber noch nicht wiederverwendbar ist.

Ein alternativer Ansatz, generativ gefertigte, FDM gedruckte großformatige Elemente im Betonbau einzusetzen, war das 2014 gestartete und auf drei Jahre begrenzte Forschungsprojekt 3DPRINTCANALHOUSE von DUS Architekten aus den Niederlanden [98]. In diesem ehrgeizigen „Research & Design by Doing“ Projekt sollte ein 3D gedrucktes Kanalhaus in Amsterdam in Originalgröße gebaut werden und so als ein Katalysator für branchenübergreifende Innovationen dienen. Für den Bau sollten großformatige parametrisch strukturierte Elemente mittels FDM als „verlorene“, partiell mit Beton befüllte Schalungen verwendet werden. Erste Prototypen dieser verlorenen Schalungselemente, welche wie die selbstspannenden textilen Schalungen ohne äußere Stützstrukturen auskommen und gleichzeitig den Beton schützen, sind in Abbildung 2-34 links und Mitte dargestellt.



Abbildung 2-34: 3DPRINTCANALHOUSE Amsterdam: großformatige freigeformte, verlorene Schalung aus FDM gedrucktem thermoplastischen Kunststoff (links), mit Beton gefülltes Schalungselement (Mitte), Fehlstelle beim FDM Druck – wahrscheinlich aufgrund von thermisch bedingten Spannungen beim Abkühlen der großen thermoplastischen Strangdicken (rechts) © Fotos Mainka 2016

Neben der Entwicklung geeigneter XL 3D Drucker zur Beherrschung der Skalierungsprobleme (Abbildung 2-34, rechts) und neuer biobasierter, nachhaltiger und recycelbarer Druckmaterialien, lag der Fokus des Projektes in der Entwicklung geeigneter Software-Tools mit einer globalen Online-Benutzeroberfläche für „smarteres“ parametrisches Design. Hiermit sollte es nicht nur möglich sein, den Bauteilen eine jeweils einzigartige äußere geometrische Struktur für den architektonischen Ausdruck der Fassade zu geben, sondern auch im Inneren der Bauteile gezielt Hohlräume einplanen zu können, um diese direkt als Funktionsintegration von unterschiedlichster Medientechnik (Heizung, Lüftung, Elektrik, Daten etc.) zu nutzen. Anhand der verfügbaren Quellen ist nicht bekannt, ob, über die Prototypenentwicklung hinaus, das Kanalhaus jemals in Originalgröße gebaut wurde, was ggf. an der großen genehmigungsbedingten öffentlich-rechtlichen Herausforderung, wie z. B. bei der Beherrschung des Brandschutzes, liegen könnte.

### 2.4.3.2 Sonderschalungen aus selektiv gebundenen Kunstharz-Sand-Gemischen

Das einzig bekannte aktuelle Bau- bzw. Entwicklungsprojekt, bei welchem durch selektives Binden gedruckte Sonderschalungen eingesetzt werden sollen, sind die parabolischen Betonsäulen des neuen Hauptbahnhofs im Rahmen von Stuttgart 21. Die Firmen Züblin AG, Meva Schalungsbau und voxeljet AG mit Unterstützung des Lehrstuhls für Informatik im Bauwesen der Ruhr-Universität Bochum haben sich dabei zusammengetan, um das Potential des 3D Drucks bei der Konstruktion und Herstellung

geometrisch komplexer Betonelemente zu untersuchen. Ziel ist dabei die Entwicklung der gesamten digitalen Prozesskette vom Entwurf im BIM Modell bis zur Erstellung eines spezifischen CNC Codes für die generative Fertigung von Sonderschalungen sowie deren 3D Druck selbst und ihre Praktikabilität beim Einsatz auf der Baustelle zum Schalen von großen freigeformten Betonstrukturen [99].

Zur Herstellung der einzelnen Sonderschalungselemente wird dabei die auf dem Sandbettdruckverfahren (Pulverbett) basierende VX 4000 3D Druckmaschine der Voxeljet AG mit einem Bauraum von 4 m x 2 m x 1 m verwendet. Während des Druckprozesses wird der als Ausgangsmaterial dienende feine Quarzsand im Pulverbett selektiv über Druckdüsen durch Kunstharze (z. B. Furan- / Phenolharz) gebunden, sodass im Vergleich zum FDM Verfahren auch Überhänge stützkonstruktionsfrei hergestellt werden können. Zum Schließen der Poren zwischen den Sandkörnern und zur Erhöhung der Robustheit und Festigkeit des gedruckten Materials werden die fertigen Schalungselemente abschließend mit Kunstharz infiltriert. Die in [99] aufgezeigten Ergebnisse zeigen, dass sich mit dieser ursprünglich für den Metallguss entwickelten Technologie je nach Ausgangsmaterial sehr fein detaillierte Sonderschalungen in einem nahezu komplett digitalen Prozess herstellen lassen. Abgesehen von der schier unbegrenzt möglichen Formenvielfalt lassen sich diese gedruckten Sonderschalungen aufgrund der hohen Festigkeit des gedruckten Materials und seiner derzeit noch hohen Kosten (etwa 3.000 €/m<sup>3</sup> zzgl. Infiltration) prinzipiell mit Sonderschalungen als Stahlschweißkonstruktion (vergl. 2.3.2) vergleichen, bei welchen sich die hohen Herstellungskosten nur bei einer hohen mehrfachen Verwendung der Schalungselemente amortisieren. Durch die fehlende Wiederverwendbarkeit des gedruckten Materials (Sand-Kunstharzgemisch) bieten sie aus ökologischer Sicht gegenüber den verfügbaren CNC gefrästen Sonderschalungsteilen aus PU oder EPS (vergl. 2.3.3) keine Vorteile und sind daher ebenfalls äußerst kritisch zu sehen.

### 2.4.3.3 Drucken von Wachs

Das Wachs Extrusions Drucken (engl. Wax Deposition Modeling – WDM), also das 3D Extrusionsdrucken von Wachs und wachsähnlichem Material, ist heute bereits technisch möglich und im kleinen Maßstab Stand der Technik. Wie z. B. bei dem System der US Firma Solidscape wird hierbei das als organisches Zwischenprodukt klassifizierte „3Z Model Wax“ (Abbildung 2-35, links), bestehend aus Sulfonamid-, Benzoate-Derivaten und Polyesterharz, thermisch erhitzt (Schmelzpunkt 95°–115°C) und über eine Extruderdüse CNC gesteuert auf eine geheizte Grundplatte appliziert. Als Stützmaterial des Model Wax wird das als Wax Blend klassifizierte „3Z Support Wax“, bestehend aus natürlichen und synthetischen Wachsen, Glycol Distearaten und Fettsäuren, verwendet. Nach dem Druckprozess kann das Stützmaterial mithilfe einer chemischen Reinigungslösung entfernt werden.

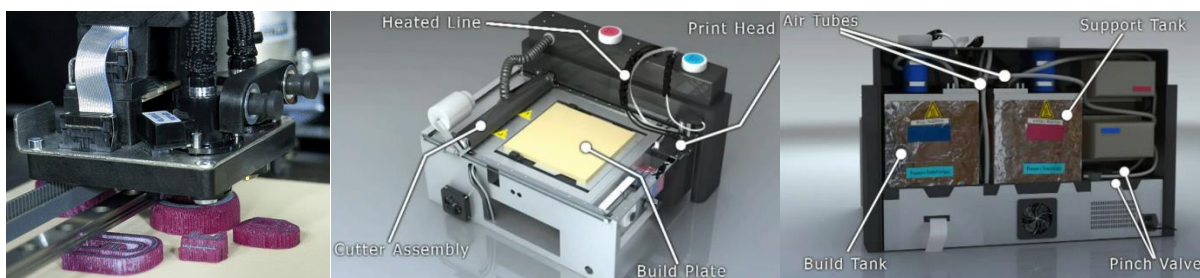


Abbildung 2-35: Extruder Druckverfahren von Wachsteilen mit dem System Solidscape® MAX: Druck von Wachsteilen für die Schmuckindustrie (blau – Modelliermaterial, violett – Stützmaterial (links), technischer Aufbau des Druckers (Mitte u. rechts) [100]

Mit dem primär für die Herstellung von Wachslingen<sup>6</sup> für den Metall-Feinguss der Schmuckindustrie entwickelten Druckverfahren lassen sich extrem filigrane Wachsmodele mit einer Genauigkeit von  $\pm 1,0 \mu\text{m}$  bis zu einer Größe von (558 x 495 x 419 mm) drucken. Da es sich beim Beton im Vergleich

<sup>6</sup> Als Wachslinge werden Positivformen für den Metall-Feinguss bezeichnet, auf welche zur Herstellung einer Gussform mehrfach besandeter Schlicker schichtweise aufgebracht wird. Vor dem Metallguss wird der Wachsling aus der Gussform ausgebrannt.

zum Metall um einen „kalten“ Guss handelt, könnten sich die mit diesem Drucker hergestellten Elemente auch direkt als freigeformte Sonderschalungen für Betonbauteile eignen. Da das gedruckte Wachs-Negativ nicht mit einem Stützmaterial ummantelt und herausgebrannt werden muss, könnte das „Model Wax“ theoretisch sogar durch Einschmelzen wiederverwendet werden. Bei genauerer Betrachtung der Investitionskosten (Drucker Typ Solidscape®MAX etwa 25.600 US\$) und der Druckmaterialkosten (Modell und Support Material je etwa 1.100 US\$ / kg) sowie des vorhandenen Bauraums und der Druckgeschwindigkeit wird jedoch deutlich, dass sich diese auf dem Markt erhältliche Technologie nicht für die Herstellung großmaßstäblicher Schalungen für den Betonbau eignet.

#### 2.4.3.4 Sonderschalungen aus FDM gedrucktem Wachs - FreeFab

In Anlehnung an die hier vorliegende Arbeit wird im sogenannten „FreeFAB™“ Forschungs- und Anwendungsprojekt des Australiers Dr. James B. Gardiner et. al. im Rahmen der Laing O'Rourke Construction Pty. Ltd.<sup>7</sup> Engineering Excellence Group ebenfalls Wachs für die Herstellung von freigeformten Sonderschalungen verwendet. Wie in [101] und [102] beschrieben, soll damit aus ähnlichen Beweggründen wie denjenigen, die zu dieser Arbeit geführt haben, ebenfalls eine Herstellungstechnologie für freigeformte Sonderschalungen für Beton auf Basis von Wachs geschaffen werden. Diese soll eine energieeffiziente, schadstoffarme, schnelle und kostengünstige Erstellung von Schalungen in einem komplett digitalen Prozess ermöglichen. Damit diese Herstellung von nahezu unendlicher Formenvielfalt an hochwertigen Freiform-Wachsschalungen auch gegenüber den herkömmlichen Verfahren wirtschaftlich ist, sollen diese Schalungen ebenfalls vollständig recycelbar (Einschmelzen und Wiederverwenden des Wachses) und auch sehr genau (in konstruktiver Sicht präzise) sein. Das Prinzip des Prozessablaufes zum 3D Drucken und anschließenden Fräsen von Wachsschalungen für Betonbauteile auf Basis der FreeFAB Technologie ist in Abbildung 2-36, links dargestellt.

Da die Herstellung von großformatigen, spannungsarmen Wachsböcken (vergl. 4.1.1) als Rohlinge (Blanks) für die CNC Fräsbearbeitung durch Gardiner als äußerst schwierig und energetisch zu aufwendig angesehen wird [101], werden bei der FreeFab Technologie konturnahe Rohlinge durch 3D Druck von Wachs mittels WDM hergestellt. Gegenüber der Blockherstellung werden dabei das geringere notwendige Material und die geringere Schmelzenergie als vorteilhaft für diesen Ansatz dargestellt. Als weiteres Argument für diese Technologie wird die innere hohle Struktur der Schalungselemente angeführt, die einerseits das Gewicht verringert und andererseits die Verteilung von erwärmter Luft oder Wasser im Inneren ermöglicht, um die Elemente während der Herstellung zu erwärmen und nach dem Aushärten des Betons leichter schmelzen zu können. Der Prozessschritt des 3D Druckens des Wachses selbst stellt bei der Entwicklung dieses Verfahrens anscheinend die größte Herausforderung dar. Um diese erfolgreich zu lösen, wurden u. a. eigens auf den Programmen Rhino und Grasshopper basierende Skripte zur Bahnplanung entwickelt, eine Extruder Prozesstechnologie mit passenden Prozessparametern (Temperatur und Durchflussrate) sowie ein darauf abgestimmtes Wachs erforscht. Zu dem erforschten und schlussendlich verwendeten Wachs selbst werden dabei in der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur keine konkreten Angaben gemacht, es wurden nur relevant erscheinende Anforderungen an das Wachs, welche teilweise konkurrieren, wie folgt festgelegt:

- niedrige Schmelztemperatur (um den Energieverbrauch zu reduzieren)
- hohe Viskosität (um ohne Trägermaterialien drucken zu können)
- geringer Schwund (um die Maßhaltigkeit der Wachsschalung zu gewährleisten)
- Bearbeitbarkeit durch CNC Fräsen (um Imperfektionen bzw. Übermaße der 3D gedruckten Wachsschalungen zu entfernen)

---

<sup>7</sup> Laing O'Rourke ist ein britisches weltweit agierendes Bauunternehmen, welches 1978 von Ray O'Rourke gegründet wurde und heute der größte private Baukonzern von Großbritannien mit einem Umsatz von über 4 Mrd. € ist [158].

Um die beim 3D Drucken auftretenden viskositäts- und temperaturbedingten Probleme des Tropfens (zu flüssig) oder der Delamination einzelner Drucklagen (vergl. 2.4.3 3) sowie des Verziehens bzw. der Delamination der gesamten Struktur von der Bauplattform zu lösen und eine hohe Druckgeschwindigkeit zu erreichen, wurde bei FreeFab der 3D Druckprozess mit einem nachgestellten CNC Frässchritt kombiniert. Hierdurch kann beim Drucken des Wachses nach dem Ansatz „*fast and dirty*“ im nahezu flüssigen Zustand ein hoher Materialdurchsatz erreicht werden. Die dabei entstehende schlechte Oberfläche wird dadurch kompensiert, dass mit einem Übermaß (etwa 5 mm zusätzliche Wachsschicht an der Oberfläche) konturnah gedruckt wird, welches in einem nachgestellten Arbeitsschritt durch CNC gesteuertes Abfräsen (Schlichtfräsen) der schalseitigen Oberfläche wieder auf das endgültige genaue Soll-Maß gebracht wird. Wenn also die gedruckten Schalungen aus Wachs dem Frischbetondruck ausreichend Widerstand leisten, ist davon auszugehen, dass die erreichbare Präzision der Schalungen und Betonbauteile der Präzision der verwendeten CNC Fräsmaschine entspricht. Nach dem (Aus-)Betonieren der so hergestellten Wachsschalung wird diese vom Betonbauteil in einem heißen Wasserbad abgeschmolzen, um so das Wachs zu recyceln bzw. wieder in den Prozess zurückführen zu können. Um planmäßig Hinterschneidungen herstellen zu können, ist das FreeFab Verfahren dabei auf eine einmalige Verwendung der Schalung ausgelegt.

In [102] wird zwar die mit diesem Verfahren gegenüber EPS basierten herkömmlichen freigeformten Schalungssystemen mögliche Abfalleinsparung nachvollziehbar dargelegt, für die bis zu 6,5-fach schnellere angegebene Herstellungszeit sowie die bis zu 5-fach günstigeren Herstellungskosten werden hingegen nur die Berechnungsformeln dargestellt, die genaue quantitative Berechnung und die Berechnungsgrundlage selbst scheinen zu fehlen. So ist z. B. nicht ersichtlich, warum die in Tabelle 1 [102] angegebenen Schlichtfräszeiten (unter Annahme einer vergleichbaren Oberflächengüte) bei einer konventionellen EPS Schalung mit Beschichtung 140 Minuten und bei der FreeFab Schalung nur 27 Minuten betragen soll.



Abbildung 2-36: Prinzip des Prozessablaufes zum 3D Drucken von Wachsschalungen für Betonbauteile auf Basis des FreeFAB Prinzips nach [102]: 1. Drucken des Wachses, 2. CNC Fräsen der Oberfläche, 3. Betonieren der Schalung, 4. Wachs abschmelzen und Recycling des Wachses, 5. Fertiges Betonbauteil (links), 3D gedruckte Schalung nach etwa 50 gedruckten Lagen (Mitte); kumulative Verzerrung im 3D Druck (rechts) © Laing O'Rourke.

Dass die FreeFAB Technologie dennoch eine marktfähige Alternative zu den bestehenden Freiformschalungstechniken darstellt, zeigt die von der Baufirma Laing O'Rourke Construction im Jahr 2016 gebaute FreeFAB Portalanlage in einem Beton-Fertigteilwerk südlich der englischen Stadt Doncaster. Mit dieser Anlage soll es möglich sein, freigeformte Sonderschalungen u. a. für Glasfaserbeton mit einer Größe von bis zu 30 m x 4 m x 1,5 m herzustellen und dabei bis zu 400 L Wachs pro Stunde verdrucken zu können. Als erstes angegebenes Projekt sollen mit der Anlage ungefähr 1400 verschiedene Sonderschalungen für die Herstellung von glasfaserverstärkten Betonpaneelen für die Auskleidung einer neuen U-Bahnstation der Londoner Crossrail hergestellt werden. Auch wenn nur wenig über das von FreeFab entwickelte Schalungsverfahren bekannt ist, kann es doch als enorm innovativ angesehen werden und zeigt zudem, dass Bauunternehmen prinzipiell an neuen Entwicklungen in der Schalungstechnologie interessiert sind, aber im Vergleich zu anderen Branchen leider nur selten die notwendigen, zumeist erheblichen direkten Investitionen in Innovation riskieren(vergl. 2.5.4 – Patent FreeFAB).



## 2.5 Relevante Patente zu Wachsschalungen

### 2.5.1 Einleitung Patentrecherche

Patente geben im Allgemeinen einen guten Überblick über die Entwicklungen bestimmter technischer Erfindungen im Laufe der Zeit. Obwohl nicht jedes Patent in der Praxis angewendet wird, zeigt die Einreichung eines Patents, dass eine bestimmte Linie von Gedanken bereits untersucht wurde und ein Problem in einer Weise gelöst wurde, deren Lösung zu dieser Zeit anscheinend rätselhaft war [83]. Zusätzlich zum dargestellten Stand der Technik und dem auf der Recherche in wissenschaftlicher Literatur, wie Zeitschriften- und Konferenzberichten, basierenden dargestellten Stand der Forschung sind Patente daher eine essenzielle Ergänzung von Informationen zu einem Themengebiet. Sie stellen zudem sicher, dass die zu erforschende Thematik nicht bereits erforscht und eventuell sogar patentrechtlich geschützt ist. Patente können darüber hinaus helfen, die allgemeinen Prinzipien einer Thematik zu verstehen, und Hinweise hinsichtlich ggf. notwendiger Weiterentwicklungen geben.

### 2.5.2 Recherchemethode

Im Zuge der Beantragung des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojektes wurde eine Recherche zu bestehenden deutschen Patentansprüchen mit einem entsprechenden Themenbezug durchgeführt. Neben DEPATISnet, der Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamtes, wurde dabei auch die im Vorfeld betrachtete nationale und internationale wissenschaftliche Literatur nach Patenten im Zusammenhang mit Sonderschalungssystemen für Beton in Verbindung mit dem wiederverwendbaren Material Wachs durchsucht. Da die Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamtes mehr als 80 Mio. Patente enthält, wurde die in Tabelle 4 dargestellte Suchstrategie angewendet, um die Anzahl der Treffer einzugrenzen.

---

*Tabelle 4: Verwendete Schlüsselwörter und Suchmethoden zum Finden von relevanten Patenten auf DEPATISnet [103]*

---

Titel, Abstract und Sequenzprotokolle. (Bereiche der DERPARTIS Expertenrecherche)  
((Wachs ODER Paraffin ODER Montanwachs ODER Mineralwachs ODER Mikrowachs ODER  
Polyethylenwachs ODER Naturwachs ODER Industriegewachs)  
UND  
(Schalung ODER Negativform ODER Verschalung)  
UND  
(Beton ODER UHFB ODER UHPFRC ODER Leichtbeton))

Basierend auf dieser Suchstrategie wurden 142 deutschsprachige Patente (schließt Gebrauchsmuster<sup>8</sup> ein) identifiziert, welche in Anhang A dieser Arbeit aufgelistet sind. Die meisten Patente haben einen beschreibenden Titel, eine kurze Zusammenfassung, die den Inhalt beschreibt, und eine separate „Volltext“-Datei mit Bildern und genaueren Erläuterungen. Diese 142 Patente wurden im Folgenden hinsichtlich ihres vollständigen Titels, des Abstracts und durch visuelles Scannen der Bilder bewertet und somit relevante Patente für eine genauere Betrachtung ermittelt. Fünf der 142 untersuchten deutschen Patente (D.-Patent) sowie zwei weitere der in der Literatur gefundenen internationalen Patente (Int.-Patent) weisen Schnittmengen mit der Thematik dieses der Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojektes auf. Im Folgenden werden diese Patente ihrer Relevanz folgend kurz dargestellt und im Kontext dieser Arbeit bewertet.

---

<sup>8</sup> „Technische Erfindungen können sowohl als Patent als auch als Gebrauchsmuster geschützt werden. Zu beachten ist dabei, dass technische, chemische und biologische Verfahren zwar patentiert, nicht aber als Gebrauchsmuster geschützt werden können. Darüber hinaus ist die Schutzdauer bei Patent und Gebrauchsmuster unterschiedlich. Gebrauchsmusterschutz gibt es zunächst für drei Jahre. Er kann auf höchstens zehn Jahre verlängert werden. Ein Patent kann bis zu zwanzig Jahre laufen. Beim Gebrauchsmuster werden die sachlichen Schutzvoraussetzungen wie Neuheit und Erfindungshöhe zunächst nicht geprüft. Erst in einem späteren Lösungs- oder Verletzungsverfahren erfolgt nachträglich eine Prüfung. Das Gebrauchsmuster ist dadurch einfacher, schneller und kostengünstiger als ein Patent. Es besteht jedoch auch eine größere Gefahr, dass es angegriffen und gelöscht wird“ [103].

### 2.5.3 D.-Patent 1: DE 000003735806 C1 und Int.-Patent 1: GB 2170752 B

Das Patent von Klaus Dittmann (D.-Patent 1) mit dem Titel: „Verfahren zur automatischen Herstellung von Sonderteilen aus Beton oder Stahlbeton“ [104] aus dem Jahr 1987 und das Patent von Ahonen et. al. (Int.-Patent 1) mit dem Titel: „Method for the manufacture of molds“ [105] aus dem Jahr 1986 weisen, wie in Abbildung 2-37 vergleichend dargestellt, große Ähnlichkeiten auf und beschreiben jeweils ein Verfahren zur Verwendung von CNC gefrästem schmelzbaren Wachs als Sonderschalung zum Gießen von Betonbauteilen. Dittmann definiert dabei sein patentiertes Verfahren in Kurzform wie folgt: „Es wird ein Verfahren zur Herstellung von Sonderteilen aus Beton oder Stahlbeton beschrieben, bei dem die Negativform mittels eines computergesteuerten Arbeitskopfes, in den über einen Datenträger die dreidimensionalen Gestaltungsmerkmale des betreffenden Sonderteils eingespeist werden, aus einer Modelliermasse mit einem Schmelzpunkt oberhalb 50°C herausgearbeitet und dann mit der Betonmasse gefüllt wird. Die herausgearbeitete Modelliermasse kann anschließend mit der Hauptmasse durch Aufschmelzen vereinigt werden und steht dann für einen neuen Arbeitsgang zur Verfügung“ [104].

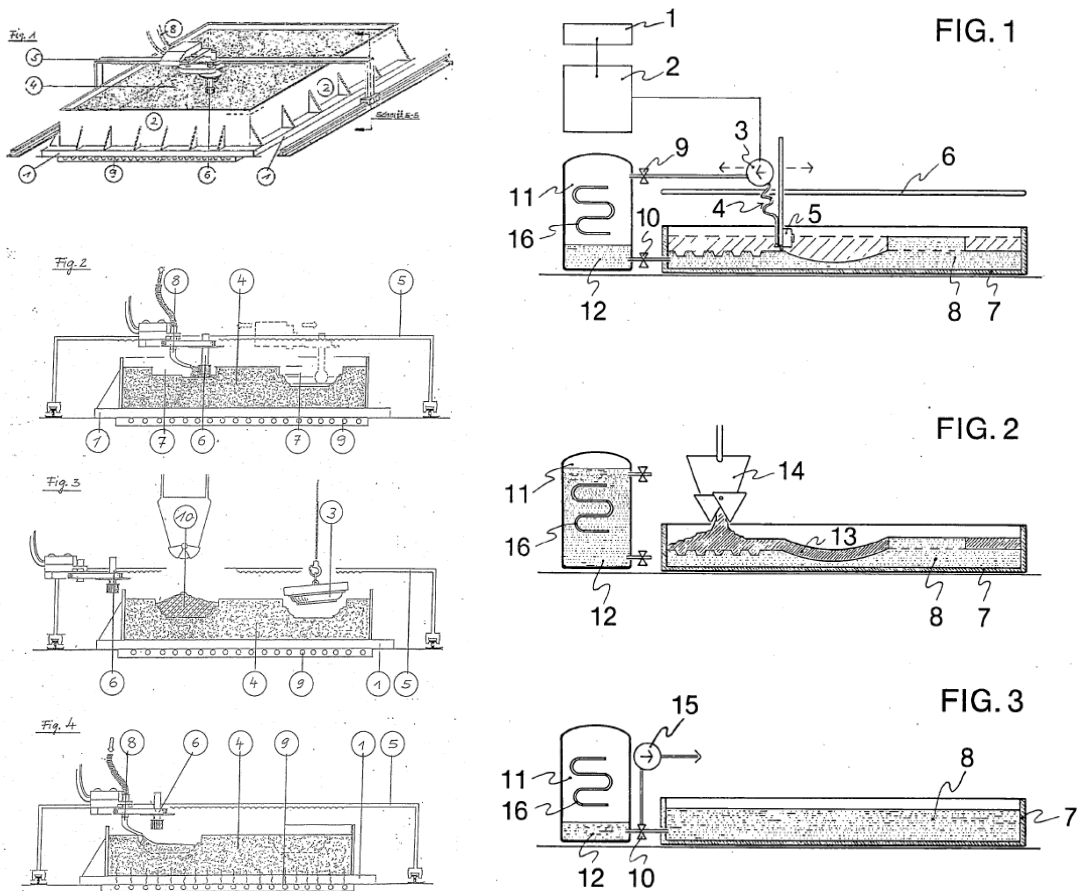


Abbildung 2-37: Vergleich patentierter Prinzipien von Prozessabläufen zur Verwendung von CNC gefrästem schmelzbaren Wachs als Sonderschalung zum Gießen von Betonbauteilen: Verfahren zur automatischen Herstellung von Sonderteilen aus Beton oder Stahlbeton nach Dittmann – Anmeldejahr 1987 (vier Abbildungen übereinander – links) [104], Method for the manufacture of molds nach Ahonen – Anmeldejahr 1987 (drei Abbildungen übereinander – rechts) [105]

Die beiden hier dargestellten Patente weisen in den folgenden Punkten schutzrechtliche Ansprüche bezogen auf die Ziele bzw. zum Inhalt und Kontext dieser Arbeit auf:

- Es wird eine wachsartige Modelliermasse (Wachs) mit einem Schmelzpunkt zwischen 50°C und 150°C im erstarrten Zustand zur Formgebung von flüssigem Beton verwendet. Die Modelliermasse kann aus Kohlenwasserstoffwachs, Stearin, Polyethylenwachs, einem teilsynthetischen oder einem vollsynthetischen Wachs bestehen.

- Die Formgebung des erstarrten Wachses erfolgt durch eine CNC gesteuerte zerspanende Bearbeitung, wofür ein Roboter oder eine CNC Portalkonstruktion mit Fräs-Spindel nebst Fräswerkzeugen (Fräsern) verwendet wird.
- Die nach dem Ausschalen des Betons verbleibende Form (Schalung) und das bei der Zerspanung zur Formgebung entstehende überschüssige Material (Frässpäne) werden durch Einschmelzen wieder vollständig recycelt bzw. mehrfach wiederverwendet, sodass das Verfahren den Anspruch der Nachhaltigkeit erfüllt (Vermeidung von Abfall).

Im folgenden Punkte weichen die Ziele bzw. der Inhalt und Kontext dieser Patente von denen dieser Arbeit ab:

- Die Patente beschreiben nur die Anwendung der formgebenden Modelliermasse zur liegenden Formgebung von flüssigem Beton auf horizontalen Schaltischen, sozusagen als einhäutige Schalung. Wie in Abbildung 1-3 dargestellt, soll das hier zu erforschende Verfahren aber ebenfalls für die Herstellung von einzelnen Schalungsmodule Anwendung finden, welche sich zu größeren Gesamtschalungen zusammensetzen lassen, um so auch zwei- oder mehrseitig geschalte Betonbauteile herstellen zu können.

Obwohl die Idee des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungskonzeptes der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie ohne das Wissen um diese beiden Patente entwickelt wurde, zeigen die Parallelen zu den in den beiden Patenten beschriebenen Verfahren und Techniken, dass die Idee bzw. das Konzept der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie nicht grundlegend neu ist, sondern durch die Darlegung in den veröffentlichten Patenten zum allgemein bekannten Stand des Wissens gezählt werden muss. Eine erneute Patentierung besonders der im Bezug zu dieser Arbeit stehenden Inhalte ist daher ausgeschlossen.

Besonders zu beachten ist dabei das Alter dieser beiden Patente von mehr als 30 Jahren und dass sie anscheinend niemals kommerziell eingesetzt wurden. Zwar wird in [83] davon berichtet, dass das Verfahren von Ahonen technisch umgesetzt und eingesetzt wurde, in der dazu verweisenden Literatur konnte dafür allerdings kein Beleg gefunden werden. Auf telefonische Rückfrage (Telefonat vom 26.05.2014) beim Deutschen Patentinhaber, Herrn Klaus Dittmann, hat dieser bestätigt, dass das „Wachsschalungsverfahren“ zwar von ihm erfunden und konzeptioniert wurde, es aber nie zu einer technischen Umsetzung seiner Erfindung gekommen ist. Im Zuge des Telefonats hat Herr Dittmann die Ansicht bestätigt, dass seine patentierte, innovative Idee zu ihrem Erfindungszeitpunkt 1987 vielleicht technologisch möglich war, aber im Grunde ihrer Zeit zu weit voraus war, weswegen keine entsprechenden Rahmenbedingungen bzw. der fehlende Bedarf die Finanzierung der technischen Umsetzung des erfundenen Verfahrens verhindert hat.

Betrachtet man dagegen die bereits 1987 im Patent aufgeführten visionären Vorteile des Verfahrens: *„Die Vorteile des Verfahrens liegen darin, daß jetzt nach einer einmalig getätigten Investition jedes beliebige Sonderteil, ohne Rücksicht auf irgendwelche Serien, ohne spezielle Fachkenntnisse und ohne jeglichen Schalungsbau exakt und ohne Übertragungsfehler vom Plan des Architekten automatisch in kürzester Zeit geschalt werden kann. Desgleichen kann die Modelliermasse wiederverwendet werden, so daß bis auf den üblichen Schwund keinerlei Materialverluste anfallen“* [104], wird deutlich, dass unter den heutigen geänderten Rahmenbedingungen, wie dem Bedarf an Nachhaltigkeit und der verbreiteten Verfügbarkeit digitaler 3D Entwurfs- und Berechnungsmethoden, eine Weiterentwicklung und Erforschung der technischen Umsetzung ein enormes Potential bieten. Dass die in diesen beiden Patenten aufgeführten Schutzrechte durch das Alter der Patente (über 20 Jahre) bereits erloschen sind, ist dabei von enormem Vorteil. Die Forschung im Rahmen dieser Arbeit kann sich somit auf die bisher fehlende Lösung der nicht unerheblichen Herausforderungen zur technischen Umsetzung (z. B. Beherrschung der Temperaturdehnung / Schrumpfen des Wachses) fokussieren, um anschließend durch eine freie Verbreitung der Erkenntnisse Dritten zu ermöglichen, die Technologie einfach und ohne patentrechtliche Einschränkungen anwenden zu können.

### 2.5.4 Int.-Patent 2: PCT/AU2014/000160

Die von Gardiner und Jannsen entwickelte Erfindung und von Laing O'Rourke Australia PTY Ltd. 2014 zum Patent angemeldete Erfindung mit dem Titel: „Methode for casting a construction element“ [106] ist im weiteren Sinn ein Verfahren zum Gießen / Schalen eines Konstruktionselements aus Beton. Das Verfahren ist bereits im Kapitel 2.4.3.4. allgemein beschrieben. Ergänzend zur allgemeinen anwendungsbezogenen Beschreibung des Verfahrens in der wissenschaftlichen Literatur in [101] und [102], wird im Patent einerseits der Herstellungsprozess der gedruckten und anschließend gefrästen Wachsschalungen in technischer Sicht detaillierter beschrieben und andererseits werden weiterführende Anwendungsmöglichkeiten dargestellt.

Patentgemäß erfolgt die Herstellung der Schalungselemente durch CNC gesteuertes Auftragen von Wachs über eine Druckdüse, welche an einem Roboter befestigt ist. Das Wachs hat einen Schmelzpunkt unter 70°C und wird der Druckdüse aus einem Reservoir über eine Leitung im flüssigen (geschmolzenen) Zustand zugeführt (Abbildung 2-38, links). Die Wachs- und die Prozessparameter sind dabei soweit abgestimmt, dass das Wachs kurz nach dem Absetzen (Auslaufen) abkühlt, rasch erhärtet und somit zumindest teilweise erstarrt. Die Wachs- und die Prozessparameter sind dabei soweit abgestimmt, dass das Wachs kurz nach dem Absetzen mit zuvor abgelagertem angrenzenden Wachs eine kohärente Verbindung eingeht. Um diese Verbindung der abgelegten Wachsstränge (Schichtdicke 0,05–1 cm) untereinander zu optimieren, ist neben dem Druckkopf eine weitere Düse angeordnet, durch die selektiv erwärmte oder gekühlte Flüssigkeiten oder Gase zugeführt werden können. Vor dem nachgestellten Arbeitsschritt, bei welchem CNC gesteuert die schalseitige Oberfläche auf das finale Soll-Maß abgefräst (Schlichtfräsen) wird (Abbildung 2-38, Mitte), beschreibt das Patent die optionale Verwendung eines am Roboterarm befestigten 3D Scanners zur Digitalisierung und Überprüfung der Maßhaltigkeit des gedruckten Schalungskörpers.

Die Verstärkung bzw. Modifizierung des Wachses durch die Zugabe oder den Auftrag von natürlichen (organischen) oder synthetischen (nicht-organischen) Fasern, Matten oder Bändern und die Verwendung der gedruckten Wachskörper als herauschmelzbarer Verdrängungskörper (Hohlraum-Wachsschalungen) zur Erstellung eines im Inneren massenreduzierten Betonkörpers wurden bereits 2014 im angemeldeten Patent beschrieben. Dabei ist äußerst bemerkenswert, dass beide Themen Bestandteil dieser Arbeit sind (vergl. u. a. 4.6), bereits im dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsantrag 2013 unabhängig vom Patent erwähnt und hinsichtlich ihrer Praktikabilität im Forschungsprojekt erforscht wurden.

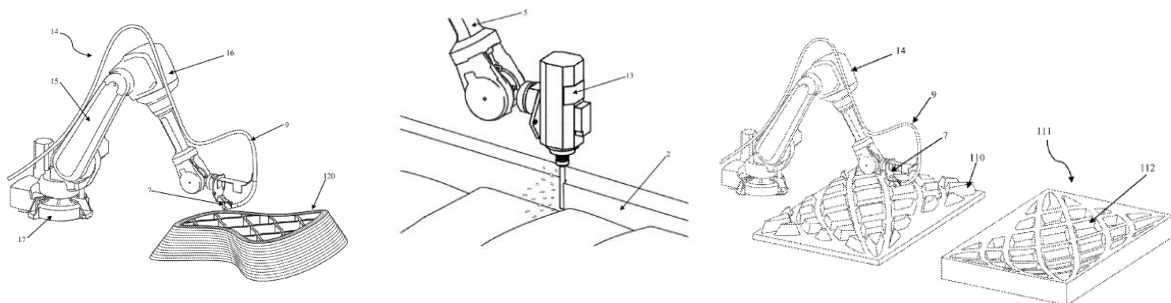


Abbildung 2-38: FreeFab Verfahren: Roboterarm mit Zuleitung und Druckdüse, die flüssiges Wachs in Wachssträngen absetzt und damit Schalungen aus „Wachs Schichtweise als FDM druckt“ (links), Frässpindel, die das überschüssige Wachs aus dem Druckprozess der Schalung entfernt und die Oberfläche auf das finale Soll-Maß abfräst (Mitte), Herstellungsbeispiel für eine Schalung einer rippenverstärkten Betonplatte, bei der die Rippen dem optimalen Kraftfluss folgen (rechts), Bilder aus [106]

Neben der bereits erwähnten Anwendung des FreeFab Verfahrens für die Herstellung von Fassadenpaneelen (vergl. 2.4.3.4) oder Hohlräumen, um in Bauteilen z. B. interne Kühlrippen (Bauteilkühlung), Lüftungsschächte oder Leitungen zu erstellen, werden im eingereichten Patent diverse weiterführende Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt, welche auch für die in dieser Arbeit beschriebene Non-Waste-Wachsschalungstechnologie denkbare Einsatzmöglichkeiten darstellen.

Beispielhaft kann der Roboter dazu verwendet werden, im Nachgang an die Schalungsherstellung und vor dem Betonieren auf die Schalungshaut unterschiedliche Materialien aufzutragen, um das herzustellende Betonbauteil zu beeinflussen. Abbindungs-Verzögerer oder Farbpigmente können z. B. die Oberflächeneigenschaften des hergestellten Betonbauteils beeinflussen, und Carbon Gelege gehen einen Verbund mit dem Beton ein und verstärken diesen in gewünschten Bereichen an der Oberfläche.

Obwohl die Idee des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungskonzeptes der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie ebenfalls ohne das Wissen um dieses eingereichte Patent entwickelt wurde, zeigt sich hier ebenfalls das Potential von wiederverwertbaren Sonderschalungen aus Wachs und es werden zudem diverse Hinweise auf weiterführende Anwendungsmöglichkeiten für diese Technologie gegeben. Da die australische Patentbehörde AusPat [107], bei welcher das Patent eingereicht wurde, den gesamten Kommunikations- und Genehmigungsprozess eines Patentes online zur Verfügung stellt, konnte anhand der abrufbaren Dokumente (Stand 01/2018) ermittelt werden, dass durch die Patentbehörde erhebliche Zweifel an der Neuheit der im angemeldeten Patent aufgeführten Ansprüche bestehen und daher dieses Patent noch nicht erteilt wurde. So wird z. B. angeführt, dass mehrere Patentansprüche durch das vorher, am 26.04.2012, durch die Firma DAIMLER AG eingereichte Patent DE 102011011577 A1 bereits offengelegt sind und somit dem Stand des allgemeinen Wissens entsprechen. Da zudem die Patente D.-Patent 1: DE 000003735806 C1 und Int.-Patent 1: GB 2170752 B (vergl. 2.5.3) anscheinend nicht in die Recherche der australischen Patentbehörde einbezogen wurden, kann bezweifelt werden, dass, wenn sie einbezogen würden, dieses Patent jemals erteilt werden wird. Aus diesen Gründen wird davon ausgegangen, dass keine Patentansprüche durch die Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie verletzt werden.

### **2.5.5 D.-Patent 2: DE 000019961062 A1**

Die von Andreas Schmidt erfundene und von der BetoRatio GmbH 2001 zum Patent angemeldete Erfindung mit dem Titel: „Schalungssystem“ beschreibt die Herstellung eines Schalungselements aus einem extrudierten Material mit hoher Festigkeit, die durch ein Verstärkungsmittel erhalten wird, das in hohen Füllgraden im Extrusionsmaterial enthalten ist. Das extrudierte Material kann im Wesentlichen aus natürlichen Materialien wie natürlichen Wachsen oder Pflanzenölen bestehen und das Verstärkungsmittel aus Holzfasern. Das Material wird mit einem Extrusionswerkzeug mit integrierter Kalibrierzone und integrierter Kühlzone in die Form des Schalungselements gebracht.

Im Vergleich zum Kontext dieser Arbeit wird bei diesem Patent zwar auch Wachs (in Kombination mit Holz als Füllstoff) als recyclingfähiges und dem Beton formgebendes Schalungsmaterial verwendet, die Patentansprüche beschränken sich aber auf lineare extrudierte Profile, welche z. B. als krümmbare Randabschalungen im Fertigteilwerk eingesetzt werden sollen. Es bestehen somit zwar Ähnlichkeiten hinsichtlich des verwendeten Materials, aber nicht hinsichtlich des Formgebungsprozesses sowie der möglichen Formenvielfalt. Aus diesen Gründen wird davon ausgegangen, dass keine Patentansprüche durch die Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie verletzt werden.

### **2.5.6 D.-Patent 3: DE102007017471 A1**

Die von Klaus Müller, Martin Jürgen, Jörg-Henry Schwabe und Markus Walter erfundene und von der BFS Betonfertigteilsysteme GmbH 2001 zum Patent angemeldete Erfindung mit dem Titel: „Verfahren zur Herstellung einer Negativform für die Fertigung von einem Gerinne aufweisenden Schachtbodenstücken“ [108] beschreibt ein Verfahren, bei welchem aus einem Grundkörper mittels eines Schneidwerkzeugs ein zur Ausbildung des Gerinneasts bestimmtes Negativformteil aus dem Grundkörper herausgelöst und auf dem Boden einer Form zur Fertigung des Schachtbodenstücks angeordnet wird. Dieser Grundkörper besteht aus einem Material, welches bei Raumtemperatur fest ist, und dann, wenn es nach dem Schmelzen durch Temperaturerhöhung und dem anschließenden

Abkühlen wieder ausgehärtet ist, im Wesentlichen die gleiche spezifische Dichte aufweist wie vor dem Schmelzen.

Im Vergleich zum Kontext dieser Arbeit wird bei diesem Patent zwar auch Wachs als recyclingfähiges, dem Beton formgebendes Schalungsmaterial verwendet, die Bearbeitung des Wachses erfolgt aber nicht durch eine spanende Bearbeitung (Fräsen), sondern durch ein besonders geformtes, erhitztes Schneidwerkzeug. Mit dem Schneidwerkzeug werden mittels Roboterführung Streifen aus einem Wachsblock herausgeschnitten. Die herausgeschnittenen Streifen werden im Anschluss zu einer Schalung einer nicht monolithischen Gerinneform zusammengefügt und zur Betonierung von Abwasserschachtböden verwendet. Zwar wird das Patent DE 000003735806 C1 (D-Pat 1 vergl. 2.5.3) als „für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschrift“ aufgeführt, in der Patentschrift selber wird aber die genaue Abgrenzung nicht näher erläutert. Da dieses Verfahren sehr speziell ist, wird davon ausgegangen, dass keine Patentansprüche durch die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie verletzt werden.

### 2.5.7 D.-Patent 4: DE 102009050487 A1

Die von Hans-Jürgen Erdbrügger erfundene und von der Betonwerk Bieren GmbH 2009 zum Patent angemeldete Erfindung mit dem Titel: „Negativform zur Herstellung eines ein Gerinne aufweisenden Schachtunterteils sowie Verfahren zur Herstellung eines derartigen Schachtunterteils“ [109] beschreibt ein Verfahren zur Herstellung einer Negativform, welche zur Herstellung eines ein Gerinne aufweisenden Schachtunterteils dient. Die Negativform umfasst dabei einen Mantel, ein formschlüssig am Mantel anliegendes Bodenstück mit einem Kern, der von dem Mantel umgeben ist, wobei die Negativform einen Füllraum zum Befüllen mit einer Betonmasse oder dergleichen aufweist. Der Kern weist eine dem Füllraum zugewandte Begrenzungsoberfläche auf, wobei die gesamte Begrenzungsoberfläche des Kerns sowie der Bereich bis 10 mm unterhalb dieser Begrenzungsoberfläche aus einem Schmelzmaterial besteht, dessen Schmelzpunkt zwischen 20°C und 100°C liegt. Dieses Schmelzmaterial weist nach dem Schmelzvorgang und anschließendem Erstarren die gleiche Dichte auf wie vor dem Schmelzvorgang.

Im Vergleich zum Kontext dieser Arbeit wird bei diesem Patent ebenfalls Wachs als recyclingfähiges, dem Beton formgebendes Schalungsmaterial verwendet. Auch die Formgebung der Wachsschalung erfolgt durch Roboter / CNC gestützte Zerspanungstechnik. Zwar wird für diese Punkte ein Patentanspruch erhoben, da aber das Patent DE 000003735806 C1 (D-Pat 1 vergl. 2.5.3) nicht als „für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschrift“ aufgeführt wird, kann bezweifelt werden, dass die Patentansprüche für diese Punkte bei einer erneuten Prüfung aufrechterhalten werden können. Weitere im Patent aufgeführte Patentansprüche weichen vom Kontext dieser Arbeit ab. So wird als Wachs (Schmelzmaterial) im Patent ein Hartparaffin aufgeführt, welches mit seinem Schmelzpunkt auf die Hydratationswärme des Betons abgestimmt ist. Dieses soll für die im Speziellen beschriebene Anwendung zur Erstellung von Schachtunterteilen das Ausschalen des „Schalungs“-Kerns erleichtern. Da dieses Verfahren sehr speziell auf die Erstellung von Schachtunterteilen aus Beton bezogen ist, wird davon ausgegangen, dass keine Patentansprüche durch die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie verletzt werden.

### **2.5.8 D.-Patent 5: Gebrauchsmuster DE 20 2008 012 108 U1**

Das durch die robatex GmbH 2008 angemeldete Gebrauchsmuster hat den Titel: „Formkörper für lichtleitende Betonelemente mit definierter Einzelfaseranordnung“ [110]. Der Formkörper besteht mindestens oder teilweise aus einer ausgehärteten Formmasse, in welche Löcher zur Aufnahme einzelner lichtleitender Fasern eingebracht werden können, wobei die Formmasse aus einem bei Raumtemperatur festen, jedoch einfach zu bearbeitenden, leicht schmelzbaren und wiederverwertbaren Material, z. B. Wachs, besteht.

Im Vergleich zum Kontext dieser Arbeit bezieht sich dieses Gebrauchsmuster zwar vorrangig auf das Einbringen von gerichteten polyoptischen Fasern in Betonbauteile, zur Herstellung der Formkörper für diese lichtleitenden Betonbauteile mit freigeformten Ansichtsflächen wird allerdings ein Verfahren beschrieben, welches Parallelen zu dem in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren aufweist. „Es werden ganze Blöcke aus der Formmasse gegossen und ausgehärtet, welche dann durch Fräsen, Fügen, Schälen, Kratzen oder Schneiden etc. oder mit künstlerischen Methoden bearbeitet werden, bis ein Negativ der gewünschten Ansichtsfläche des Betonbauteils entsteht. Der erfindungsgemäße Formkörper ist die Einheit aus Schalung und freigeformter Negativform.“ Da es sich hierbei um ein Gebrauchsmuster handelt, wurden die Inhalte nicht durch das Patentamt geprüft. In Bezug auf Patent DE 000003735806 C1 (D-Pat 1 vergl. 2.5.3) kann davon ausgegangen werden, dass die Patentansprüche des „Schalungsteils“ keinen Bestand haben und daher, dass keine Schutzrechte durch die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie verletzt werden.



### 2.6 Zusammenfassung Kapitel 2 und Vorgehensweise im Folgenden

Ziel des Kapitels 2 ist es, die historische Entwicklung des Systemschalungsbaus darzustellen und relevante Begriffsabgrenzungen und Definitionen für den Kontext der Arbeit vorzunehmen. Zusammen mit dem anschließenden Überblick über den Stand der Technik zum Sonderschalungsbau für freigeformte Betonbauteile konnte nicht nur gezeigt werden, dass sich das analoge Schalungshandwerk in den vergangenen Jahrzehnten hin zu einer digitalen Schalungstechnologie entwickelt hat, sondern auch, dass ein hoher Bedarf an neuartigen Sonderschalungssystemen mit diversen unterschiedlichen Anforderungen, wie der Einbindung in die digitale Entwurfs- und Produktionskette, besteht.

Basierend auf dem aktuellen Stand der Forschung im Sonderschalungsbau, einschließlich der Analyse der jeweiligen Vor- und Nachteile, zeigt sich, dass vielversprechende neue Forschungsansätze für neue Sonderschalungssysteme und -technologien bestehen. Da alle der betrachteten neuen Forschungsansätze die vier der für eine erfolgreiche Entwicklung der **Non-Waste-Wachsschalungstechnologie definierten Anforderungen** (vergl. 1.3):

- **höchstmögliche Formfreiheit**
- **Präzision / Oberflächengüte**
- **Ökologie und Nachhaltigkeit**
- **ökonomisch sinnvoll (Wirtschaftlichkeit)**

nur in einem unterschiedlich zufriedenstellenden Maße erfüllen, stellt sich abschließend die Frage, wie gut sie sich für eine praktikable Anwendung in der Bauwirtschaft eignen bzw. welche Informationen sich daraus für die Entwicklung einer optimaleren Sonderschalungstechnologie ziehen lassen können.

**Textile Schalungen und CNC gesteuerte adaptive Schalungssysteme** erreichen zwar gute Oberflächengüten und sind in ökologischer und ökonomischer Hinsicht äußerst effizient, bieten aber nur eine eingeschränkte Formfreiheit und mäßige Präzision.

**Sandschalungen** erreichen eine größere Formfreiheit, sind präziser und bei Anwendung von wiederverwendbarem Sand ebenfalls ökologisch, die mögliche Oberflächengüte sowie der komplexe, teilweise manuelle Herstellungsprozess sind aus ökonomischer Sicht hingegen fragwürdig.

**Aktiv geführte Schalungen** bieten für die Zukunft ein großes Potential in der Oberflächenverbesserung von 3D gedruckten Betonbauteilen, die dargestellten aktuellen Projekte, z. B. zur Herstellung von Stützen, bieten allerdings nur eine stark eingeschränkte Formfreiheit.

**Gedruckte Sonderschalungen** bieten prinzipiell eine enorm große Formfreiheit, mögliche Präzision und Oberflächengüte, je nach angewendetem Druckverfahren und eingesetztem Material sind sie aber bisher weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll einzusetzen.

**Sonderschalungen aus Wachs** zeigen aufgrund des hervorragenden Zusammenspiels von Wachs und Beton sowie der speziellen Materialeigenschaften von Wachs besonders bei der Erstellung von Kleinserien und Unikaten das größte Potential, da mit ihnen eine sehr hohe Präzision, Oberflächengüte und Formfreiheit erreicht werden kann. Durch die Wiederverwendbarkeit des Wachses durch Einschmelzen („Closed Loop Recycling“) sind sie zudem nicht nur ökologisch, sondern auch hinsichtlich der Materialkosten je Einsatz extrem ökonomisch.

Der erste Ansatz von Gramazio / Kohler Research an der ETH Zürich zeigt die Herausforderungen, die es bei der Verwendung von Wachs als Schalungsmaterial zu beherrschen gilt. Besonders die Temperatur und die damit einhergehende, vergleichsweise hohe thermische Volumenänderung (Schrumpf) von Wachs führen bei einer großformatigen Verwendung des Wachses als flüssige Abformmasse im Erstarrungs- / Abkühlprozess zu unvermeidbaren Verformungen, inneren Spannungen und somit zu einer inakzeptablen niedrigen Präzision der Schalung.

Das „FreeFAB™“ Forschungs- und Anwendungsprojekt von Dr. James B. Gardiner löste anscheinend die Probleme der thermischen Volumenänderung des Wachses durch einen 3D Druckprozess (WDM) mit anschließender Nachbearbeitung durch CNC gesteuertes Fräsen. Hierdurch können in technischer Hinsicht mit Wachs die Anforderungen zur Herstellung von Sonderschalungen, eine sehr hohe Formfreiheit bis hin zu sehr starker Krümmung (KK4), Texturen und komplexen Details sowie eine sehr hohe Präzision und Oberflächengüte erreicht werden. Aus ökonomischer Sicht ist dabei allerdings der dafür notwendige sehr langwierige Druckprozess (Materialauftrag / Zeit) des Wachses hinsichtlich seiner Prozesskosten (Betriebs- und Abschreibungskosten eines roboterbasierten Druckers) überaus fragwürdig.

Basierend auf diesen Überlegungen und der Patentrecherche können daher für die Zielsetzung bzw. die Anforderungen an die Verfahrensentwicklung (vergl. 1.3) der Non-Waste-Wachsschalungen im Rahmen dieser Arbeit folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Die Wachsschalungstechnologie hat ein enormes Potential, und sie wurde bereits mit diversen Innovationspreisen für unterschiedliche Projekte ausgezeichnet wurde, und ist auch für große Baufirmen wie Laing O'Rourke Construction äußerst interessant.
2. Die gefundenen Patente zeigen, dass die Ideen nicht neu sind und dass Visionäre über die damit verbundenen Möglichkeiten schon nachgedacht haben. Anhand der Patentrecherche konnte gezeigt werden, dass ein eventueller Patentschutz für die Kernprozesse der Wachsschalungstechnologie bereits ausgelaufen ist und der Inhalt dieser Patente somit einen allgemein bekannten und frei zugänglichen Stand des Wissens darstellt.
3. Die selektive Analyse geeigneter fräsbarer Wachse unter Beachtung seiner physikalisch-mechanischen Eigenschaften ist von essentieller Bedeutung. Dazu zählen Druck-, Biege- und Zugfestigkeit, E-Modul, Zeitstandfestigkeit / Kriechen, temperaturabhängiges Dehnungsverhalten bzw. Volumenänderung, thermische Analysen zur Messung von abgegebener oder aufgenommener Wärmemenge (DSC) sowie Wärmeleitfähigkeit.
4. Besonders um die thermische Volumenänderung des Wachses zu beherrschen und eine sehr hohe Präzision der Schalung und der Betonbauteile zu erreichen, sollte das Wachs bei nahezu gleicher (Raum-)Temperatur in seine Schalungsform gebracht und ausbetoniert werden.
5. Um das Verfahren auch aus ökonomischer Sicht wirtschaftlich zu gestalten sollen:
  - 5.1. Anstelle eines langwierigen Wachs-Druckprozesses ein Verfahren für die Herstellung von großformatigen, spannungsarmen Wachsblöcken als Rohlinge (Blanks) für die CNC Fräsbearbeitung entwickelt werden.
  - 5.2. Um diese einzelnen Wachsblöcke modular zu großen Formen zusammenfügen zu können, müssen zudem geeignete Verbindungs- bzw. Verankerungsmittel entwickelt und durch geeignete, dem Wachs angepasste Entschalungshilfen zur zerstörungsfreien Trennung von Wachs und erstarrtem Betonbauteil entwickelt werden.
  - 5.3. Optimale Fräswerkzeuge, -strategien und Prozessparameter (Eingriff, Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit) ermittelt werden, die eine extrem effiziente Bearbeitung des Wachses (beim Schrappen und Schlichten) bei gleichzeitig hoher Präzision und Oberflächengüte ermöglichen.

Damit aus bauunternehmerischer Sicht die neue Technologie überhaupt eine Chance hat, sich auf dem Markt zu etablieren, müssen außerdem in einer abschließenden Beurteilung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie im Vergleich mit anderen Verfahren verschiedene Aspekte verifiziert werden. Neben den wirtschaftlichen Aspekten sollten die Präzision, die Oberflächengüte und besonders die Robustheit und unkomplizierte Anwendung des Gesamtverfahrens – zumindest an Beispielen – nachgewiesen werden.

### 3 Grundlagen, Analyse und Selektion geeigneter technischer Wachse als Schalungsmaterial

#### 3.1 Eigenschaften von technischen Wachsen

##### 3.1.1 Definition und Einteilung von Wachsen

Die allgemeine Definition „Wachs ist eine technologische Sammelbezeichnung für eine Reihe natürlicher und künstlich gewonnener Stoffe“ [111] ist sehr unscharf, so wie auch die chemische Zusammensetzung und Herkunft von Wachs sehr unterschiedlich sein kann. Um dennoch eine genauere Abgrenzung des Begriffes „Wachs“ vornehmen zu können, wird Wachs daher u. a. durch seine physikalisch-mechanischen Eigenschaften definiert, ohne dabei Rücksicht auf die chemische Zusammensetzung zu nehmen. Nach [112] und [113] müssen sechs Attribute erfüllt sein, damit ein Stoff als Wachs charakterisiert werden kann:

1. bei 20°C knetbar, fest bis brüchig hart
2. grob- bis feinkristallin, durchscheinend bis opak, jedoch nicht glasartig
3. über 40°C ohne Zersetzung schmelzend
4. schon wenig oberhalb des Schmelzpunktes verhältnismäßig niedrigviskos
5. stark temperaturabhängig in Konsistenz und Löslichkeit
6. unter leichtem Druck polierbar

Diese Kriterien wurden auch von der Deutschen Gesellschaft für Fettwissenschaft e.V. DGF in ihre Deutsche Einheitsmethoden zur Untersuchung von Fetten, Fettprodukten, Tensiden und verwandten Stoffen übernommen [114]. Ist mehr als eine der oben aufgeführten Eigenschaften nicht erfüllt, ist der Stoff nach Definition der DGF-Einheitsmethode M-I 1 (75) (Begriffsbestimmung) kein Wachs.

Wie in Abbildung 3-1 dargestellt, lassen sich Wachse oberflächlich in **Naturwachse** (natürlich gewonnene Stoffe) und **industriell gefertigte Wachse** (künstlich gewonnene Stoffe) unterteilen. Eine genauere Unterteilung von Wachsen lässt sich dagegen gemäß ihrer Herkunft in Tierisches, Pflanzliches, Mineral-, Erdöl- und Synthetisches Wachs vornehmen.

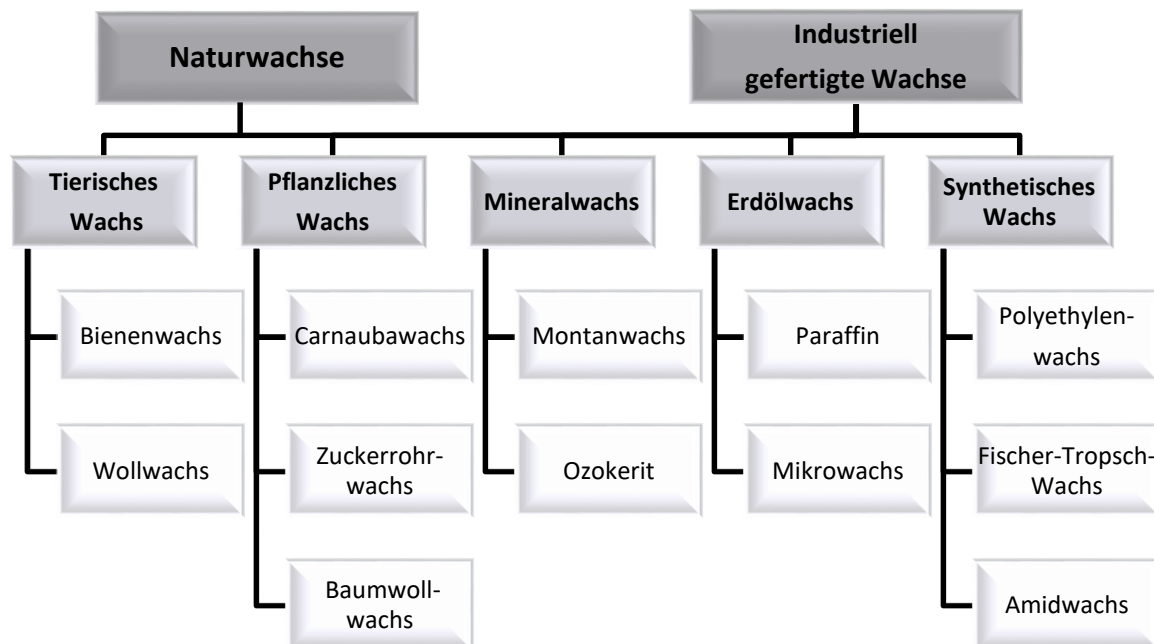


Abbildung 3-1: Organigramm: Beispielhafte Zuordnung der häufigsten Wachsorten

Zu den Naturwachsen zählen tierische und pflanzliche Wachse. Die bekanntesten tierischen Wachse sind Bienen- und Wollwachs. Die bekanntesten pflanzlichen Wachse sind Carnauba- und

Zuckerrohrwachs. Der Großteil tierischer und pflanzlicher Wachse besitzt ein niedriges Schmelzintervall (um 50°C) und ist verglichen mit industriell gefertigten Wachsen weicher. Die jeweiligen Eigenschaften der Naturwachse variieren stark und hängen von der Art und den geografischen Umständen ihrer Gewinnung ab.

Eine genaue Zuordnung von Mineral- oder Erdölwachsen gestaltet sich als schwierig. Sie können einerseits als natürlich „fossile“ Wachse vorkommen und so den Naturwachsen zugeordnet werden und andererseits aus diesen „fossilen“ Wachsen extrahiert, raffiniert oder destilliert und somit den industriell gefertigten Wachsen zugeordnet werden. Diese auch als veränderte oder chemisch modifizierte Naturwachse bezeichneten industriell gefertigten Wachse sind z. B. Montanwachs (aus Braunkohle- oder Torfwachsen) oder Paraffin / Mikrowachs (z. B. aus den wachsartigen Anteilen des Erdöls). Die jeweiligen Eigenschaften der als natürlich „fossil“ vorkommenden Wachse variieren dabei ebenfalls stark, wohingegen die daraus extrahierten industriell gefertigten Wachse (bzw. veränderten oder chemisch modifizierten Wachse) deutlich geringere Schwankungen in ihren Eigenschaften aufweisen.

Zu den rein industriell gefertigten Wachsen gehören synthetische Wachse, z. B. Polyethylenwachs (PE-Wachs), Fischer-Tropsch-Wachs (FT-Wachs) und Amidwachs. Synthetische Wachse werden durch Verfahren wie (Hoch-, Mittel, Niederdruck-)Polymerisation, -kondensation oder -addition aus in Syntheseprodukten enthaltenen Wachsen künstlich hergestellt. Durch diesen kontrollierten synthetischen Herstellungsprozess weisen diese industriell hergestellten Wachse ebenfalls deutlich geringere Schwankungen in ihren Eigenschaften auf als rein natürliche Wachse [111].

Aufgrund geringerer Schwankungen und somit einer höheren Reproduzierbarkeit ihrer Eigenschaften und zudem der höheren Verfügbarkeit wurde die Auswahl potentiell geeigneter Wachse für die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie auf industriell gefertigte Wachse eingeschränkt.

#### 3.1.2 Chemische Struktur und Gefüge von Wachsen

Nach [115] wird unter **der Struktur** der Feinaufbau der Stoffe auf atomarer und molekularer Ebene bezeichnet. Obwohl für den Nutzer die anwendungsorientierte Funktion des Wachses wichtig ist und nicht so sehr sein (chemischer) Feinaufbau, ist dieser dennoch von hoher Bedeutung, da er im hohen Maße die Eigenschaften des Wachses bestimmt [116]. Leider lassen sich dabei die einzelnen Eigenschaften eines Wachses nicht den jeweiligen atomaren und molekularen Bestandteilen direkt zuweisen, da sich diese im komplexen Stoffgemisch, welches Wachse darstellen können, in einem hohen Maße gegenseitig beeinflussen [117].

Wie vielfältig dieses komplexe Stoffgemisch sein kann, zeigt dabei die Definition der DGF des Begriffes „Wachs“ aus chemischer Sicht: Wachs ist eine Sammelbezeichnung für Ester langkettiger Fettsäuren bzw. Wachssäuren mit langkettigen Alkoholen (Fettalkohole), Stearylalkoholen, Triterpen- oder Steroidalkoholen [113].

Allgemein ausgedrückt sind Wachse der Gruppe der organischen Stoffe bzw. der hochmolekularen organischen Verbindungen (Polymere) zuzuordnen. Auf atomarer Ebene sind sie also Stoffe, die im Besonderen Kohlenstoff, Wasserstoff, zum Teil auch Sauerstoff und Stickstoff und im geringen Maße weitere Elemente wie z. B. Chlor enthalten [118]. Auf der Ebene der chemischen Verbindungen bzw. auf molekularer Ebene sind einerseits eine Vielzahl chemischer Verbindungen in den Wachsen enthalten und andererseits im Allgemeinen wenige, aber vielfältig miteinander kombinierte Verbindungstypen.

Die wichtigsten Bestandteile bzw. organischen Verbindungen von Wachsen sind:

- Kohlenwasserstoffe<sup>9</sup>
- Alkohole
- Terpen- und Harzalkohole, Sterine
- Ketone
- Carbonsäuren
- Oxycarbonsäuren
- Ester, Chlorkohlenwasserstoffe und Stickstoffverbindungen

Die Grundbausteine der industriell gefertigten Wachse, wie z. B. Montanwachs, Paraffin oder Mikrowachs, bestehen ebenso wie Fischer-Tropsch- und Polyethylenwachse hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen, die diesen Wachsen auch ihre charakteristischen Eigenschaften verleihen. Die einfachste Kohlenwasserstoffverbindung ist das Gas Methan mit der Summenformel  $\text{CH}_4$ .

Die Anordnung der Kohlenstoffatome ist hauptsächlich kettenförmig, und zwar geradkettig oder verzweigt. In der Chemie werden die geradkettigen Kohlenwasserstoffe als n-Alkane bezeichnet, sie haben die allgemeine Summenformel  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ . Die verzweigten Kohlenwasserstoffe werden Isoalkane genannt. Eine weitere Möglichkeit bei der Anordnung der Kohlenstoffatome ist eine ringförmige bzw. cyclische Form. Diese bilden die Gruppe der Cycloalkane und haben die Summenformel  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ . Sie zeigen ein ähnliches chemisches Verhalten wie die offenkettigen Alkane [119]. Die gesättigten Kohlenwasserstoffe werden auch Paraffine (Normal- oder n-Paraffine) genannt.

Nach [111] sind typische Kohlenwasserstoffkettenlängen von fettartigen Wachsen:  $n = 16$  bis  $18$  (z. B. Amidwachs) für Paraffinwachs  $n = 20$  bis  $60$  und für Polyethylenwachs weniger als einhundert bis einige tausend. Neben der Kettenlänge selbst (und damit der Molmasse) beeinflussen die Molmassenverteilung und der Verzweigungsgrad ebenfalls die Eigenschaften von Wachsen. Das Schmelzintervall (Tropf- und Erweichungspunkte), die Schmelzviskosität und der Härtegrad nehmen mit zunehmender Kettenlänge zu. Dies ist auf zunehmende Van-der-Waals-Kräfte<sup>10</sup> (sekundäre Bindungskräfte) zwischen den Molekülen zurückzuführen. Hohe unsymmetrische Verzweigungsgrade senken den Schmelzpunkt und die Härte, symmetrisch als Seitenketten angeordnete  $\text{CH}_3$ -Gruppen erhöhen sie dagegen.

Nach [115] wird **das Gefüge** als die Grobstruktur eines Stoffes definiert. Auf der Ebene des Gefüges gehören Wachse zur Familie der kristallinen Stoffe, die weitgehend zu einer Mischkristallisation befähigt sind und deren Komponenten in der Schmelze homogen ineinander löslich sind. Wie thermoplastische Kunststoffe bestehen Wachse vornehmlich aus linearen oder verzweigten Molekülketten, welche untereinander ausschließlich durch sekundäre Bindungskräfte zusammengehalten werden. Aufgrund dieses Zusammenhalts kann ein Thermoplast oder Wachs im Gegensatz zu den vernetzten Kunststoffen (z. B. Duroplasten) immer wieder geschmolzen werden. Aufgrund dieser sekundären Bindungskräfte sind Wachse zudem schweißbar und löslich. Analog zu thermoplastischen Kunststoffen können Wachse in amorph und teilkristallin kategorisiert werden.

Nicht alle Polymere auf molekularer Ebene im Stoffgemisch Wachs sind kristallisierbar, da eine Kristallisation bei Polymeren kristallisierbare Ketten und intermolekulare Wechselwirkungen (sekundäre

---

<sup>9</sup> Kohlenwasserstoffmoleküle sind als Ganzes unpolar und lösen sich daher gut in anderen Kohlenwasserstoffen, hingegen nicht in polaren Lösemitteln wie Wasser, und verleihen Wachsen z. B. ihre wasserabweisende Eigenschaft. Solche Verbindungen werden als hydrophob (Wasser abweisend) oder lipophil (Fett liebend) bezeichnet. Unpolare Bindungen liegen z. B. zwischen zwei gleichartigen Atomen oder bei einer geringen Elektronegativitätsdifferenz zwischen den Atomen vor. Die Elektronendichte ist bei Unpolarität also gleichmäßig auf die Atome verteilt [119].

<sup>10</sup> Van-der-Waals-Kräfte sind intermolekulare Wechselwirkungen und entstehen durch Bildung positiver und negativer Partialladungen eigentlich unpolarer Teilchen. Diese polarisieren durch eine ungleichmäßige Elektronendichtenverteilung im Molekül. Van-der-Waals-Kräfte haben nicht so starke Anziehungskräfte wie polare Bindungen, führen aber zu weiteren Wechselwirkungen [119].



Bindungskräfte), wie z. B. H-Brückenbindungen<sup>11</sup>, voraussetzt. Nicht kristallisierbar sind z. B. vernetzte und verzweigte Ketten, wie diese in makro- und mikrokristallinen Paraffinen enthalten sind, da diese Molekülketten sich nicht parallel zu einer Kristallstruktur aneinanderlagern können. Sind die Bausteine kristallisierbar, hängt die Kristallinität auch von den Bedingungen für das Kristallwachstum ab, das heißt von thermodynamischen Größen wie Druck, Temperatur und der Geschwindigkeit der Abkühlung. Rasches Abkühlen führt zu einer erhöhten glasigen Erstarrung mit vielen amorphen Bereichen. Durch langsames Abkühlen oder auch Tempern (eine nachträgliche Wärmebehandlung) kann die Kristallinität dagegen erhöht werden, da Kristalle Zeit benötigen, um sich durch Ausrichtung der Ketten zu bilden. Die kristalline bzw. teilkristalline Struktur eines Wachses (im erstarrten Zustand) ist daher immer auch eine Funktion seiner thermischen Vorgeschichte [120].

In ihrer Beschaffenheit ähneln Wachse ganz besonders den Ölen, Fetten und Kunststoffen, weisen dabei aber auch Unterschiede hinsichtlich ihrer inneren Strukturen und chemischen Zusammensetzungen auf [112]. Am anschaulichsten lassen sich diese Ähnlichkeit sowie der Einfluss der Kettenlänge und des Kristallisationsgrades am Beispiel der Polyethylenwachse bzw. des teilkristallinen thermoplastischen Kunststoffes Polyethylen darstellen.

Polyethylen (Kurzzeichen PE) ist ein durch Kettenpolymerisation von Ethen ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ) vollsynthetisch hergestellter unpolare thermoplastische Kunststoff und besitzt einen sehr einfachen und regelmäßigen Molekülaufbau. Dieses ermöglicht ein teilkristallines Erstarren. Polyethylen gehört zur Gruppe der Polyolefine, ist weltweit sehr stark verbreitet und besonders für die Herstellung von Verpackungen bekannt.

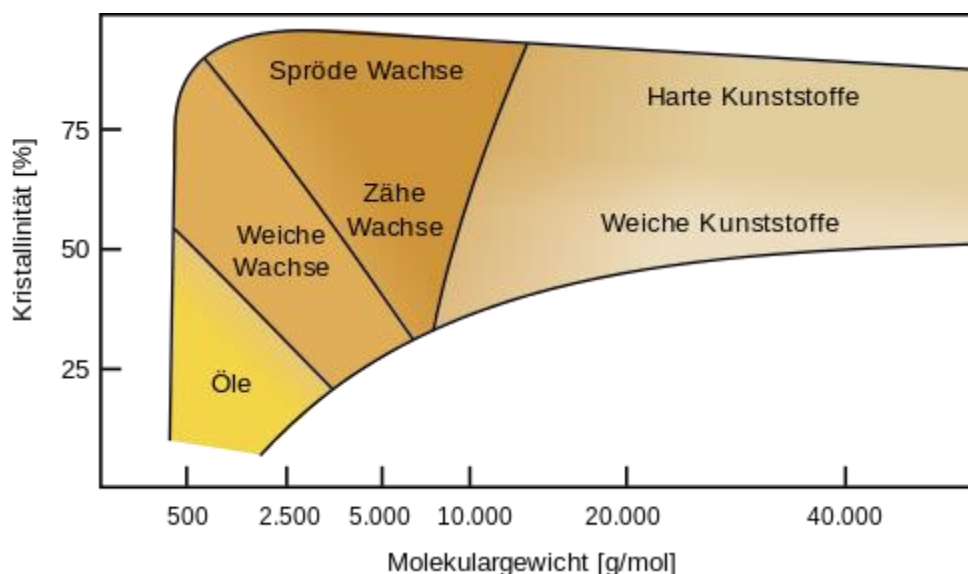


Abbildung 3-2: „Molekulargewicht“ (mittlere molare Masse abhängig von den Kohlenwasserstoffkettenlängen) von Polyethylen im Verhältnis zum Anteil der Kristallinität (abhängig von der Geradlinigkeit bzw. Verzweigkeit der Kohlenwasserstoffketten). Darstellung der so synthetisch hergestellten Produkte mit entsprechend resultierenden mechanischen Eigenschaften aus [121], basierend auf [122].

Wie in Abbildung 3-2 dargestellt, lassen sich durch eine gezielte Steuerung des synthetischen Polymerisationsverfahrens hinsichtlich Reaktorgröße, Druck, Temperatur, Dauer, Katalysatortyp etc. gezielt Kohlenwasserstoffketten (Polymere) mit bestimmten Längen (entsprechendem Molekulargewicht) und Geradlinigkeit bzw. Verzweigkeit (entsprechendem Kristallisationsvermögen) herstellen. Dabei kann die direkte Polymerisation so gelenkt werden, dass keine hochmolekularen, kunststoffartigen, sondern niedermolekulare, wachsartige Polymerisate entstehen. Alternativ können auch PE-Kunststoffe durch thermisches Cracken zu PE-Wachsen abgebaut werden. PE-Wachse liegen

<sup>11</sup> Bei Wasserstoff-Brückenbindungen handelt es sich um eine ausgeprägte Form der Dipol-Dipol-Wechselwirkung. Dabei ziehen sich zwei Dipole, also zwei Atome unterschiedlicher Elektronegativität, gegenseitig an [119].

so im mittleren Molmassenbereich von 2000–20000 g/mol im Massenmittel [118]. Durch die bedeutend kürzeren Kohlenstoffketten von PE-Wachsen gegenüber PE-Kunststoffen sind daher die Verschlaufungen und Berührungslängen (somit Van-der-Waals-Kräfte) zwischen den Ketten im festen Zustand geringer, wodurch PE-Wachse eine geringere Härte / mechanische Festigkeit, ein niedrigeres Schmelzintervall und eine niedrigere Schmelzviskosität aufweisen.

Die mechanischen Eigenschaften der hergestellten unterschiedlichen PE-Produkte (Abbildung 3-2) wie z. B. der teilkristallinen PE-Wachse setzen sich dabei u. a. aus den Eigenschaften ihrer kristallinen und der amorphen Bereiche zusammen bzw. werden von ihnen bestimmt. Die im erhärteten Zustand vorliegende Kristallinität bzw. der Kristallisationsgrad (also das Verhältnis von kristallisierten zu amorphen Bereichen) der PE-Produkte hängt einerseits vom Kristallisationsvermögen (Geradlinigkeit bzw. Verzweigkeit der enthaltenen Kohlenwasserstoffketten) und andererseits von den Kristallisationsbedingungen, also der thermischen Vorgeschichte (z.B. der Abkühlgeschwindigkeit), ab. Durch gezielte Steuerung der Kristallisation im Polymerisationsverfahren können so neben harten (PE-HD) oder weichen (PE-LD) PE-Kunststoffen PE-Fette / Öle und PE-Wachse von spröde (hoher Kristallisationsgrad von bis zu etwa 90 %) über zäh bis hin zu weich (niedriger Kristallisationsgrad mit etwa 25 %) hergestellt werden [123].

#### 3.1.3 Wichtige physikalisch-mechanische Eigenschaften von Wachsen

Nach [117] stellt „die Komplexnatur des Wachszustandes in der Gesamtheit der Inhaltsstoffe eines Waxes kein einfaches mechanisches Gemenge dar, das die Summe der Eigenschaften aller Stoffe wiedergibt, sondern es liegt ein Stoffsystem vor, dessen Eigenschaften sich aus den Einzelstoffen statistisch nicht voraussagen oder berechnen lassen“. Auf Basis der allgemeinen chemischen Struktur und des Gefüges von Wachs lassen sich aber dennoch einige der folgenden allgemeinen und wichtigen physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Wachs ableiten, die für das Verständnis zur Verwendung von Wachs als Schalungsmaterial für Betonbauteile von Bedeutung sind:

##### 3.1.3.1 Aggregatzustände / Einfluss der Kristallinität auf den Wärmeausdehnungskoeffizienten, die Dichte und Festigkeit

Wie in [124] beschrieben, besteht bei thermoplastischen Kunststoffen (und Wachsen gleichermaßen) eine starke Temperaturabhängigkeit der sekundären Bindungskräfte der Kettenmoleküle untereinander. Die Aggregatzustände (auch Phasen genannt) sind dabei durch den Einfluss der Temperatur auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften sowie eine Volumenveränderung gekennzeichnet. Bei tiefen Temperaturen sind Wachse fest. Obwohl sie bei Raumtemperatur (etwa bei 20°C) nach Definition der DGF (vergl. 3.1.1) auch knetbar oder brüchig hart sein können, sollten sie zur Anwendbarkeit als Schalungsmaterial als festes, nicht zu weiches und damit knetbares oder zu hartes und somit zu sprödes Medium vorliegen. Dabei treten sie je nach Kristallinität in dieser Phase entweder kristallin, amorph oder als Mischvariante teilkristallin auf. Der Einfluss der Temperatur auf das spezifische Volumen bei amorphen und kristallinen Materialien wie Wachs ist in Abbildung 3-3 dargestellt.

Ausgehend von der festen Phase werden die sekundären Bindungskräfte zwischen den einzelnen Polymerketten zunehmend durch Temperaturerhöhung verringert, und es kommt zu einer leichten, linear mit der Temperatur ansteigenden Volumenvergrößerung. Bei Überschreiten der Glasübergangstemperatur  $T_G$  (auch Erweichungsbereich genannt) erweichen die glasförmig erstarrten, amorphen Bereiche, gehen in einen Zustand erhöhter Flexibilität („Gummizustand“) über und der Wärmeausdehnungskoeffizient steigt an. Über  $T_G$  wird für amorphe Materialien diese Phase auch als „unterkühlte Schmelze“ bezeichnet, da sich die sekundären Bindungskräfte einfach weiter lösen und der Wärmeausdehnungskoeffizient selbst bei Überschreiten des Schmelzpunktes  $T_S$  konstant bleibt. Bei den viel näher beieinanderliegenden kristallin gebundenen Polymerketten sind hingegen beim Überschreiten von  $T_G$  noch sehr viele sekundäre Bindungskräfte vorhanden, die sich erst bei Erreichen des Kristallisationstemperaturpunktes  $T_K$  anfangen zu lösen und am Schmelzpunkt  $T_S$  vollständig lösen. Bei ideal kristallinen Materialien kommt es dabei durch das Auflösen der Kristallstruktur am  $T_K$  zu einem

Volumensprung (Abbildung 3-3: zwischen durchgezogener Linie „kristallin“ und durchgezogener Linie „Flüssigkeit“). Bis zum Erreichen der Zersetzungstemperatur  $T_z$ , bei der sich die Schmelze bzw. das Material zersetzt, handelt es sich theoretisch um einen reversiblen Aufschmelzprozess.

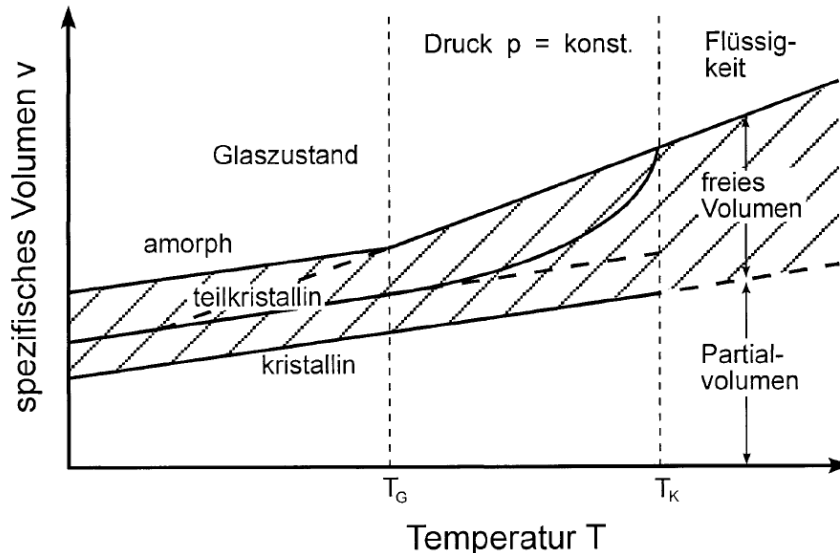


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Änderung des spezifischen Volumens mit der Temperatur bei amorphen und kristallinen Materialien, der Anstieg der Gradienten gibt den jeweiligen Wärmeausdehnungskoeffizienten wieder, aus [125]

Das Verhalten von teilkristallinen Materialien wie Wachs ist komplexer und lässt sich am verständlichsten über die Abkühlung aus der flüssigen Schmelze erläutern. Durch langsame Erniedrigung der Temperatur unterhalb von  $T_s$  bzw.  $T_K$  kommt es zu einer regelmäßigen Anordnung der zur Kristallisation befähigten Molekülketten (Ordnungszustand) und dadurch zum „Wachstum von Kristallen“. Schnelles Abkühlen hingegen behindert die Bildung von Kristallen und fördert die Bildung amorpher Bereiche. Obwohl oft von den Temperaturpunkten wie z. B. dem Schmelzpunkt  $T_s$  gesprochen wird, treten diese in der Regel nur bei chemisch reinen Substanzen als scharfer exakter Schmelzpunkt auf, bei Wachsen dagegen als mehr oder weniger breites und unscharfes Schmelzintervall [126], in welchem  $T_s$  und  $T_K$  verschwimmen. Dieses liegt bei Wachsen am Vorhandensein von einer Vielzahl an unterschiedlichen Polymeren, die z. B. bei unterschiedlichen Kristallisationstemperaturen  $T_K$  dazu neigen, jeweils verschieden große Kristallite zu bilden, welche sich wiederum unterschiedlich schnell bilden. Aus diesem Grund werden in der wachsverarbeitenden Industrie anstelle eines Schmelzpunktes der Tropfpunkt (entspricht etwa  $T_s$ ) und der niedrigere Erstarrungspunkt (Entspricht etwa  $T_K$ ), z. B. zur Eingrenzung des Schmelzintervalls, bestimmt. Aufgrund der höheren Ordnung und der sekundären Bindungskräfte sind kristalline Bereiche im Allgemeinen dichter gepackt und haben weniger freies Volumen (wie z. B. Poren) als amorphe Bereiche. Wie in Abbildung 3-3 schematisch dargestellt, ist die Dichte eines teilkristallinen Wachses im festen Zustand, z. B. bei Raumtemperatur, niedriger, also u. a. abhängig von seiner thermischen Vorgeschichte bzw. seiner Abkühlgeschwindigkeit. Durch den Anteil der „dicht gepackten“ Kristallite erhöht sich u. a. die Härte und Sprödeheit des Materials, die höhere Elastizität und Schlagzähigkeit der amorphen Bereiche nimmt dabei aber ab.

Für die Anwendung von Wachsen als Schalungsmaterial stellt sich die Frage, ob über die Steuerung der Abkühlgeschwindigkeit aus der Schmelze das Wachs im Prozess der Wachsblockherstellung eher schnell oder langsam abgekühlt werden sollte und ob eher ein kristallines oder amorphes Wachs für das Verfahren von Vorteil ist.

Vorteilhaft bei einem langsamen Abkühlen hin zu einem stärker teilkristallinen Wachs (Abbildung 3-4, rechts) ist die höhere Druck- und Zugfestigkeit, Steifigkeit und Dimensionsstabilität bzw. Formbeständigkeit gegenüber amorphem Wachs.

Unter Betrachtung des Gesamtprozesses scheint es aber eher günstig zu sein, das Wachs möglichst schnell hin zu einem stärker amorphem Wachs mit geringer Teilkristallinität (Abbildung 3-4, links) abzukühlen. Vorteilhaft sind hier die schnellere Abkühlzeit, wodurch besonders die Herstellung von großen Wachsblöcken durch die Zeitersparnis wirtschaftlicher ist, die geringere als problematisch angesehene thermische Volumenausdehnung (bzw. Schrumpf) und die geringere Dichte, wodurch die Schalungselemente zudem bei gleichem Volumen leichter werden.

Basierend auf diesen theoretischen Überlegungen sollte daher versucht werden, das Wachs zur Verwendung als Schalungsmaterial durch möglichst schnelles Abkühlen in Blöcke zu gießen, um einen möglichst hohen Anteil an amorphem, „glasartig erstarrten“ Wachsen in der späteren Schalung vorzufinden. Für die Auswahl eines geeigneten Wachses bedeutet dies, dass die vom amorphem Material gegenüber teilkristallinem Material geringere Druck- und Zugfestigkeit sowie Neigung zu einer höheren viskoelastischen Verformung (d. h. das amorphe Wachs beginnt schneller zu kriechen) berücksichtigt werden muss und der thermische Gebrauchsbereich (ausreichend fester Zustand) eines Wachses sich immer unterhalb der Glasübergangstemperatur  $T_G$  befinden muss, da generell eine Wärme-Formbeständigkeit für amorphe Polymere nur unterhalb der Glasübergangstemperatur gegeben ist. Zu beachten ist dabei allerdings, dass bei einem schnellen Abkühlen des Wachses zu Blöcken, ähnlich wie bei thermisch vorgespanntem Sicherheitsglas, starke innere Spannungen im Wachs entstehen können.

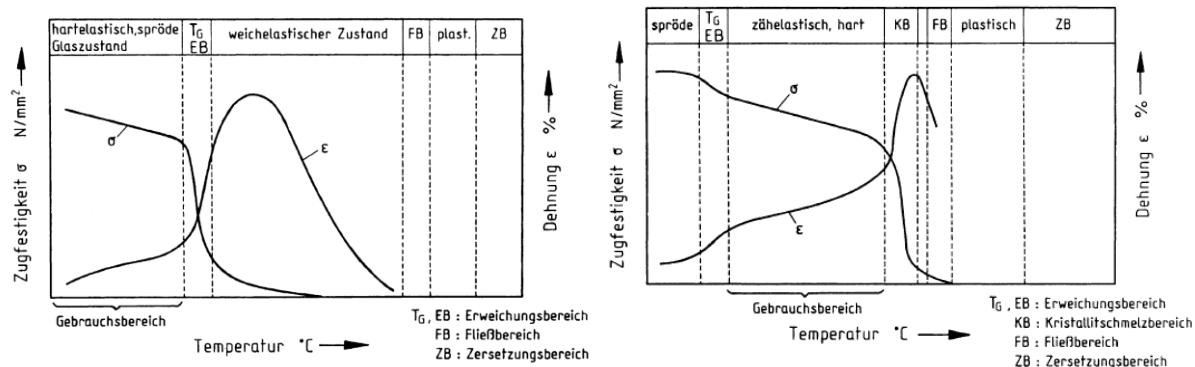


Abbildung 3-4: Formänderungsverhalten eines amorphen Kunststoffes / Wachses (links) und teilkristallinen Kunststoffes / Wachses (rechts) aus [125]

#### 3.1.3.2 Temperatur- und zeitabhängige physikalisch-mechanische Eigenschaften von Wachsen

Wie in Abbildung 3-4 dargestellt, weisen amorphe oder teilkristalline Wachse eine stark von der Temperatur abhängige Härte / Festigkeit und Dehnung auf, da sich die sekundären Bindungskräfte zwischen den einzelnen Polymerketten zunehmend durch Temperaturerhöhung verringern. Bei tiefen Temperaturen (im festen Zustand) sind alle Wachse relativ starr und verhalten sich ähnlich wie z. B. kalt- oder warmverformter Stahl. Bei einer schnellen Laststeigerung werden sie erst elastisch gestaucht, und nach Überschreiten einer Fließgrenze kommt es je nach Wachs zum Sprödbbruch oder zu einer spontanen plastischen Verformung. Für Wachsschalungen ist dieser „Grenzzustand der Tragfähigkeit“ bei Erreichen der Fließgrenze des Wachses zwar auch von Bedeutung, da eine solch hohe Lasteinwirkung ein Versagen der Schalung zur Folge hätte, es steht aber vielmehr die „Gebrauchstauglichkeit“, also die Begrenzung der Verformung der Schalung unter einer konstanten Belastung, im Vordergrund. Bei einer mechanischen Belastung zeigen Wachse, wie auch thermoplastische Kunststoffe, ein stark von der Temperatur, Zeit und der Belastungsgeschwindigkeit<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Die Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit wirkt sich ähnlich wie eine Temperaturniedrigung und umgekehrt aus. Die Belastungsgeschwindigkeit sollte daher für Versuche moderat gewählt werden.

abhängiges plasto-elastisches oder auch viskoelastisches Verhalten mit jeweils unterschiedlichen elastischen und plastischen Verformungsanteilen [124].

In Abbildung 3-5, links ist das grundlegende plasto-elastische Verhalten von Wachs über die Zeit bei einer konstanten Temperatur dargestellt. Zuerst kommt es bei einer Belastung (Krafteinwirkung auf das Wachs) zu einer spontanen elastischen Dehnung  $\varepsilon_{el,0}$  (U). Bei anhaltender Belastung kommt es im Folgenden zu einer nachwirkenden zeitabhängigen Dehnung  $\varepsilon_k$  (V), die sich wie beim Kriechen des Betons aus einer zeitabhängigen elastischen  $\varepsilon_v$  und zeitabhängigen plastischen  $\varepsilon_f$  Formänderung zusammensetzt. Nach Entlastung kommt es zu einer spontanen elastischen Rückfederung (W) und einer nachwirkenden langsam auslaufenden Rückfederung (X) der zeitabhängigen elastischen Formänderung. Als verbleibende Deformation bzw. Verformungsrest bleibt der zeitabhängige plastische Anteil der Formänderung (Z). Abbildung 3-5, rechts zeigt am Beispiel von drei verschiedenen Wachsen aus der Zahntechnologie, wie unterschiedlich das plasto-elastische Verhalten verschiedener Wachse bei variabler Belastung und unterschiedlichen Temperaturen sein kann.

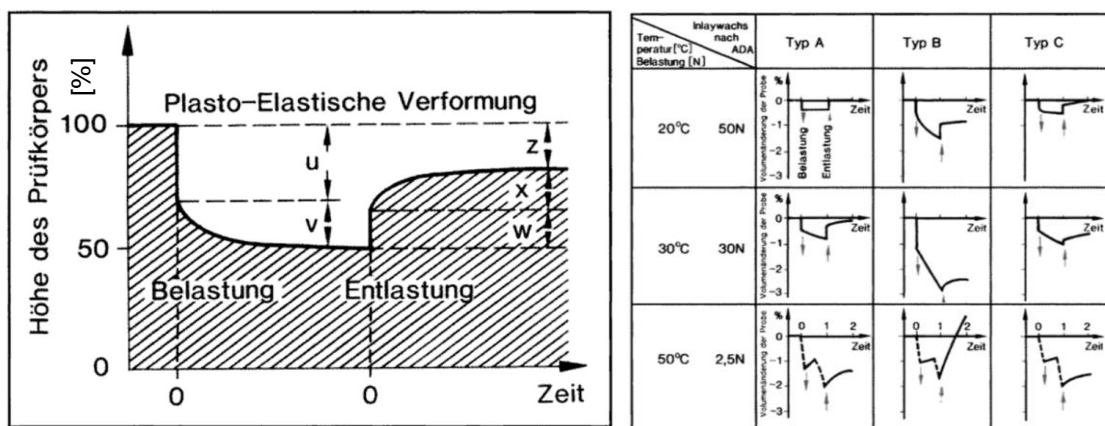


Abbildung 3-5: Last-Weg / Zeit-Diagramme: Grundlegendes plasto-elastisches Verhalten von Wachs bei konstanter Temperatur (links), beispielhaftes unterschiedliches plasto-elastisches Verhalten von drei verschiedenen Wachsen aus der Zahntechnologie bei variabler Belastung und unterschiedlichen Temperaturen (rechts) [127]

In einem ersten Schritt bedeutet dies für die Auswahl und Beurteilung eines geeigneten Wachses, dass bei einer festen Temperatur, vornehmlich der Normaltemperatur beim Betonieren von 20° C,

- die spontan elastische Verformung des Wachses unter der maßgebenden Belastung (Frischbetondruck) möglichst gering ist und unter der geforderten Präzision / zulässigen Maßabweichung des herzustellenden Betonbauteils liegt
- und die Gesamtverformung über die Zeit, also die Summe der spontan elastischen sowie der zeitabhängigen elastischen und der zeitabhängigen plastischen Verformung bis zum Erstarren des Betons (starke Reduktion des Frischbetondrucks durch Abbinden des Betons), ebenfalls möglichst gering ist und unter der geforderten Präzision / zulässigen Maßabweichung des herzustellenden Betonbauteils liegt. Besonders ist hierbei auf die zeitabhängige plastische Verformung zu achten, da diese zu einer verbleibenden Deformation führen kann und somit die Wiederverwendbarkeit der Schalung beeinträchtigt.

Weil die Erwärmung des Wachses u. a. vor der Erstarrung des Betons aufgrund der Hydrationswärme nicht auszuschließen ist, muss in einem zweiten Schritt der maximale thermische Gebrauchsbereich des Wachses anhand des plasto-elastischen (bzw. viskoelastischen) Verformungsverhaltens in Abhängigkeit der maßgebenden Belastung und der zulässigen Gesamtverformung bestimmt werden. Da während des Erstarrens bzw. während der Hydratation des Frischbetons die resultierende Belastung auf die Schalungen ab- und die entstehende Hydrationswärme zunimmt, ist dieses je nach unterschiedlichem Beton äußerst komplex und muss daher für jeden Beton einzeln betrachtet werden. Zudem ist die Starrheit der Umgebung (des Schalungsträgers) bzw. die Form des Wachs-Schalungskörpers zu beachten, da diese ggf. der Verformung entgegenwirkt.



### 3.2 Relevante Einflussgrößen auf die Wachse als Schalungsmaterial

#### (Spezifizierung der Anforderungen an die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie)

Aufbauend auf den an die Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie gestellten generellen Anforderungen (vergl. 1.3), werden diese im Folgenden genauer quantitativ spezifiziert, um daraus ein physikalisch-mechanisches Anforderungsprofil zur Auswahl eines als Schalungsmaterial geeigneten Wachses abzuleiten. Die Spezifizierung der Anforderungen dient zudem als Grundlage für die abschließende Bewertung der entwickelten Non-Waste-Wachsschalungstechnologie.

#### 3.2.1 Maßgebende Betoneigenschaften

Weil eine optimale hochpräzise Formgebung nach dem Prinzip „form follows force“ aufgrund des hohen Zementgehaltes und der hohen Kosten besonders bei Bauteilen aus UHPC sinnvoll ist, wird für die Entwicklung als maßgebender Beton UHPC festgelegt. Da die Wachsschalungen natürlich auch für Normalbetone bis hin zu Leichtbetonen anwendbar sein sollen, kann in einem nachfolgenden Schritt die Anwendbarkeit auch für diese Betone überprüft werden, wobei besonders auf die Interaktion von Erstarrungs- und Hydratationstemperaturverlauf geachtet werden muss.

Aufgrund der exzellenten Erfahrungen mit einem UHPC auf Basis des Bindemittels NANODUR® Compound 5941 Grau im DFG Forschungsvorhaben „Von der Bauteilförmung zu leichten Tragwerken“ wurden für die Entwicklung und Verifizierung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie dieses Bindemittel und die verwendete UHPC Rezeptur, wie in Tabelle 5 dargestellt, verwendet, allerdings ohne Zugabe von Stahlfasern.

Tabelle 5: Zusammensetzung und Eigenschaften der verwendeten UHPC ND-2,5 Rezeptur, basierend auf UHPFRC ND-2,5 aus [62]

Zusammensetzung und Eigenschaften	Wert	Einheit
Bindemittel Typ: NANODUR® Compound 5941 Grau	1100	[kg/m³]
Quarzsand 0,125–0,5 [mm]	1012	[kg/m³]
Wasser	159	[kg/m³]
Fließmittel Typ: GRACE® Adva Flow 375	21	[kg/m³]
Schwindreduzierer Typ: GRACE® Eclipse® Floor	7	[kg/m³]
(Fasern (lf: 11 mm / df: 0,18 mm, <i>nicht verwendet</i> )	(192)	[kg/m³]
Ausbreitmaß [DIN09a]	760	[mm]
Setzfließmaß [DIN09b]	850	[mm]
Luftporengehalt	3,2	[%]
Elastizitätsmodul	49,2	[GPa]
Zugfestigkeit $f_{ctm}$	8,0	[MPa]
Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp,28}$	18,9	[MPa]
Prismenbiegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$	21,6	[MPa]
Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm,7}$	109	[MPa]
Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm}$	136	[MPa]

Obwohl der verwendete UHPC (ND-2,5) durch seinen hohen Zementanteil eine hohe Hydratationswärmeentwicklung zeigt und sich somit je nach Bauteildicke und Dämmvermögen der Schalung eine hohe Temperaturentwicklung im Bauteil ergibt, haben am ITE durchgeführte Vorversuche gezeigt, dass diese erst relativ spät nach dem Einbringen des UHPC beginnt. Wie in Abbildung 3-6 dargestellt, ist die Hydratationstemperaturentwicklung bei dem untersuchten Probekörper aus UHPC ND-2,5 im Vergleich zu einem C30/37 Feinkornbeton (etwa. 400 kg/m³ Portland Zement

PUR 4 N) quantitativ zwar sehr hoch, beginnt aber erst etwa 13 h nach dem Mischen (Wasserzugabe) und erreicht ihren Temperaturpeak erst nach etwa 20 h.

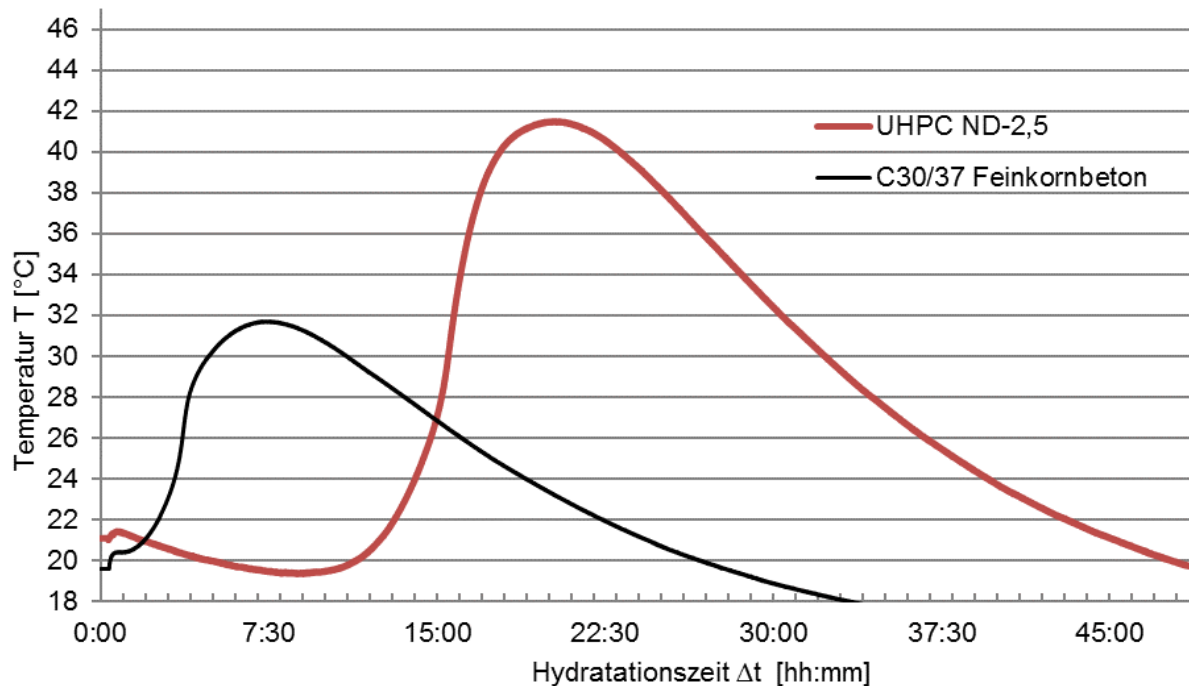


Abbildung 3-6: Temperatur / Hydratationszeit-Diagramme: Versuch am ITE zur Messung der Entwicklung der Hydratationstemperatur an der Zwischenschicht vom einem Betonprobekörper (30 x 30 x 30 cm) und einer umlaufenden, 10 cm starken XPS Isolierschicht, UHPC (Typ UHPC ND-2,5) rot, Normal- bzw. Feinkornbeton C30/37 (etwa 400 kg/m<sup>3</sup> Portland Zement PUR 4 N) schwarz

Da der verwendete UHPC ND-2,5 zum Zeitpunkt  $\Delta t = 13$  h des Temperaturanstiegs bereits sein Erstarrungsende gemäß Knetbeuteltest nach DIN 18218 [128] aufweist, sollte zu diesem Zeitpunkt kaum noch horizontaler Frischbetondruck vom Beton auf die Schalung wirken. Zwar ist ab diesem Zeitpunkt ein Erweichen des Wachses aufgrund des Übergangs der Hydratationswärme vom UHPC auf die Schalung möglich, da aber zu diesem Zeitpunkt kaum noch Druck vom Bauteil ausgeht, ist eine Verformung der Schalung nicht zu erwarten. In einem weiteren Versuch, welcher durch das ITE bei der Firma Sudholt-Wasemann bei der Herstellung eines großformatigen Bauteils aus UHPC ND-2,5 durchgeführt wurde, konnte diese Annahme durch die Auswertung der Messergebnisse von in der Schalung platzierten Druck- und Temperatursensoren bestätigt werden.

Mit Bezug auf den verwendeten Referenzbeton UHPC ND-2,5 bedeutet dies, dass den allgemeinen Annahmen in Kapitel 3.1.3.2 gefolgt werden kann und dass ein geeignetes Wachs den maßgebenden Belastungen bei einer Referenztemperatur von 20°C und über einen Zeitraum von 13 h unter Berücksichtigung seines plasto-elastischen Verhaltens (Kriechen des Wachses) in hinreichendem Maß widerstehen muss.

Nach dem Zeitpunkt  $\Delta t = 13$  h wird davon ausgegangen, dass nur noch die thermische Belastung und das Eigengewicht des Wachses maßgebend wird. Eine Vielzahl an Untersuchungen zum plasto-elastischen Verhalten der Wachse bei unterschiedlichsten Temperaturen und Belastungen wird daher nicht als notwendig angesehen.

Die in den Vorversuchen ermittelte maximale Temperatur von etwa 40°C, die aufgrund der Hydratation in einem UHPC Bauteil mit einer Dicke von 30 cm erreicht wird, ist dagegen als maßgebend anzunehmen. Basierend auf dieser Annahme sollte der Erweichungspunkt eines geeigneten Wachses über 40°C und der Schmelzbereich somit entsprechend höher liegen, damit dieser sich nicht unter seinem Eigengewicht verformt. Da UHPC normalerweise nur dünnwandig verbaut wird, wird davon ausgegangen, dass keine Bauteile dicker als 30 cm mit den Wachsschalungen hergestellt werden oder unter denen des EPS PS40 von etwa 80 €/m<sup>2</sup> (brutto) liegen.

die Hydratationstemperaturentwicklung vorab rechnerisch oder versuchstechnisch für jeden Beton bestimmt bzw. entsprechend technisch, z. B. durch Kühlung der Schalung, begrenzt wird.

#### 3.2.2 Maßgebende Krafteinwirkung / Frischbetondruck

Wie u. a. in [129] nachgewiesen wurde, hat für geneigte und somit auch für komplex geformte Schalungen die Berechnung des maßgebenden Frischbetondrucks nach DIN 18218 [128] Bestand. Obwohl diverse Abminderungsmöglichkeiten für den maßgebenden Frischbetondruck beschrieben werden, soll der ungünstigste Lastfall das Einbringen von z. B. UHPC als selbstverdichtender Beton (SVB) durch Pumpen von unten berücksichtigt werden. Hierfür ist für die Maximalspannung  $\sigma_{hk,max}$  der hydrostatische Frischbetondruck bezogen auf die Einfüllstelle anzusetzen. Die maximale Höhendifferenz zwischen der Einfüllstelle und dem oberen Betonspiegel sollte dabei zu keinem Zeitpunkt 3,5 m überschreiten. Hieraus ergibt sich ein  $\sigma_{hk,max,3,5m}$  zu 0,0875 N/mm<sup>2</sup>. Um einen Sicherheitsbeiwert für die maßgebende Belastung zu berücksichtigen, wird  $\sigma_{hk,max,3,5m}$  anstelle der in der Norm [128] angegebenen 1,5 mit dem Faktor 2,85 (etwa das Doppelte) beaufschlagt.

Hieraus ergibt sich eine maßgebende Belastung (Bemessungswert des Frischbetondrucks) für das Wachs als Schalungsmaterial von  $\sigma_{hd,max}$  zu 0,25 N/mm<sup>2</sup>, was in etwa dem hydrostatischen Frischbetondruck am Fußpunkt einer 10 m hohen Frischbetonsäule entspricht.

Da das formgebende Wachs im Hinblick auf die Definition der Bestandteile von Schalungselementen (vergl. 2.2.1) zugleich die Schalhaut und den Schalungsträger bildet, muss ein geeignetes Wachs diese Belastung beim Einbringen des UHPC bzw. danach, bis zum Erreichen seiner Erstarrung, in seinem thermischen Gebrauchsbereich aushalten und darf sich dabei nur im Rahmen der maßgebenden Präzision verformen. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die das Wachs stützenden Gurtungen und Unterkonstruktionen so bemessen sind, dass sie dieser maßgebenden Belastung standhalten und die maßgebende Präzision nicht ungünstig beeinflussen.

#### 3.2.3 Maßgebende Präzision (Maßabweichungen)

In Abhängigkeit von der maßgebenden Belastung und der vorliegenden variablen Dicke der Wachselemente soll es mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie möglich sein, hochpräzise Schalungen herzustellen, mit welchen ebenso hochpräzise Betonbauteile produziert werden können. Da die zu erreichende Präzision für das Bauwesen möglichst hoch sein soll, wird als Zielwert der Wert von  $\pm 1,0$  mm festgelegt. Bezogen auf ein Nennmaß von 1 m spiegelt dieser Wert (vergl. 2.2.2) in etwa die Anforderungen des Maschinenbaus nach DIN ISO 2768 [48], Tab 1 für die Toleranzklasse mittel (m) von  $\pm 0,8$  mm wider und liegt dabei noch deutlich unter den Forderungen der DIN 18203-1 [47], T1, Z4 für die Längen und Breiten von Fassadentafeln im Bauwesen. Um die festgelegten maximalen Maßabweichungen einhalten zu können, ergeben sich für ein angenommenes Wachsschalungselement mit einer Dicke von 0,1 m die im Folgenden aufgeführten maximalen Verformungen bzw. Dehnungen, welche sich unter dem maßgebenden Frischbetondruck bis zur Erstarrung des UHPCs einstellen dürfen:

Die Gesamtverformung ( $\epsilon_{el,0} + \epsilon_{k,13h}$ ) darf maximal 1 % betragen. Unter der Annahme, dass sich ( $\epsilon_{el,0} + \epsilon_{k,13h}$ ) zu gleichen Teilen verteilen, sollten diese jeweils maximal 0,5 % betragen.

#### 3.2.4 Ökologische und ökonomische Parameter

Damit das Verfahren nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern auch aus ökonomischen Gesichtspunkten erfolgreich sein kann, muss die Einhaltung eines geschlossenen Schalungsmaterialkreislaufes als ein sogenannter „Closed Loop Recycling“ Prozess gewährleistet sein. Hierzu muss sich das Wachs so verlustfrei und oft wie möglich wieder einschmelzen lassen, ohne dass es dabei durch Oxidationsprozesse seine physikalisch-mechanischen Eigenschaften ändert. Zudem sollte die benötigte Schmelzenthalpie bzw. Schmelzenergie zum Einschmelzen so gering wie möglich sein, da sie maßgebend die Wiederverwendungskosten (Recyclingkosten) beeinflusst. Um mit dem als maßgebend angesehenen, jeweils nur einmal verwendbaren „Einweg“-Material EPS PS 40 (40 kg/m<sup>3</sup>) konkurrieren zu können, sollten die Materialkosten des Wachses je Einsatz ( $WAX_{jE}$ ) nach Gl. (1)

$$EPS_{inv} = 130 \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] > WAX_{jE} = \frac{WAX_{inv}}{WAX_{wvr}} + Ek_{Schm} \quad (1)$$

Da die Investitionskosten (Materialinvestitionskosten) des Wachses ( $WAX_{inv}$ ) und die notwendigen Schmelzenergiekosten ( $Ek_{Schm}$ ) je  $\text{m}^3$  Wachs feste Größen darstellen, kann hieraus in Abhängigkeit des Wachses die erforderliche Wiederverwendungsrate ( $WAX_{wvr}$ ) errechnet werden, ab welcher das Wachs gegenüber EPS oder anderen Materialien wirtschaftlich wird. Neben den gegenüber XPS geringeren Materialkosten je Einsatz muss das Wachs zudem auch mindestens gleiche Bearbeitungs- bzw. Fräsgeschwindigkeiten und bessere physikalisch-mechanische Materialeigenschaften erreichen.

### 3.2.5 Maßgebendes Formenspektrum und Oberflächengüte

Basierend auf der Formfreiheit, welche CNC gefräste Sonderschalungen aus z. B. Polyurethan (PU) ermöglichen (vergl. 2.3.3), soll die Wachsschalung ebenfalls als maßgebendes Formenspektrum bzw. Formfreiheit die Herstellung sehr komplexer Bauteilgeometrien mit starken Krümmaturen (Krümmungsradien der Krümmungskategorien bis einschließlich KK 4, 0,05 m–1,5 m), Texturen und Detaillierungen (vergl. 2.2.4) ermöglichen. Ohne dass die gefrästen Wachsschalungen einer manuellen Nachbearbeitung bedürfen, soll es mit ihnen möglich sein, eine Oberflächenqualität der Sichtbetonklasse SB4 für Betonoberflächen mit besonders hohen gestalterischen Anforderungen zu erreichen (vergl. 2.2.2).

Um diese hohe Formenvielfalt bei zudem hoher Oberflächengüte zu erreichen, muss ein geeignetes Wachs sehr schnell, sauber und glatt fräsbearbeitbar sein. Einerseits darf das Wachs nicht zu ölig / klebrig / weich / duktil sein, da sich sonst der Span nicht vom Wachs bzw. Fräser löst und es so zu Anhaftungen an den gefrästen Schalungsoberflächen kommt bzw. der Fräser sich zusetzt und den Fräsprozess blockiert. Andererseits darf das Wachs nicht zu brüchig / spröde sein, da es sonst, bedingt durch den Schnittprozess im Zusammenspiel mit der Vibration der Fräse, beim Fräsen zu Ausbrüchen an Kanten und filigranen Geometrien kommen kann.

### 3.2.6 Anforderungsprofile für Wachse als Schalungsmaterial

Zusammenfassend ergeben sich aus dem vorherigen Kapitel 3.2 die in Tabelle 6 dargestellten physikalisch-mechanischen und weiteren Anforderungen an ein für die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie geeignetes Wachs:

Tabelle 6: Anforderungsprofile für Wachse als Schalungsmaterial

<b>Glasübergangstemperatur<sup>13</sup> (<math>T_G</math>) bzw. Erweichungsbereich (EB)</b>	> 40°C	
<b>Schmelzintervall bzw. Erstarrungspunkt (<math>E_P</math>)</b>	> 50°C	nach [104], besser noch über 60°C
<b>Druckfestigkeit <math>\sigma_{hd,max}</math> (elastisch) bei 20°C</b>	> 0,25 N/mm <sup>2</sup>	als Zielwert sollte diese eventuell um den Faktor 10 höher liegen (entspricht 2,5 N/mm <sup>2</sup> ), damit sichergestellt wird, dass sich beim Aufbringen von Last ausschließlich eine spontan elastische und nicht eine spontan plastische Verformung einstellt
<b>Druck E-Modul</b> möglichst hoch, jedoch	> 25 N/mm <sup>2</sup>	(abgeleitet aus maximal 0,5 % zul. $\epsilon_{el,0}$ Dehnung; besser ebenfalls Faktor 10, was 250 N/mm <sup>2</sup> entspricht)
<b>Kriechverformung</b> (Zeitstandfestigkeit) bei $\sigma_{hd,max}$ zu 0,25 N/mm <sup>2</sup> nach 13 h ( $\epsilon_{k,13h}$ )	< 0,5 %	außerdem sollte die Gesamtverformung ( $\epsilon_{el,0} + \epsilon_{k,13h}$ ) 1,0 % nicht überschreiten
<b>Thermische Volumenausdehnung</b> fest 20°C / flüssig ( $T_P$ ) in [%]	mögl. gering	(vergl. 3.1.3.1) ungünstig für Blockherstellung
<b>Schmelzenthalpie / -energie</b> in [J/g]	mögl. gering	dieses beeinflusst die thermischen Recyclingkosten
<b>Fräsbarkeit</b> des Wachses bei 20°C	geeignet	muss durch spanende Werkzeuge sauber bearbeitet bzw. geschnitten werden können

Industriewachse werden bisher hauptsächlich als chemische Zusätze oder im Metallguss verwendet, wo vornehmlich ihre chemischen Eigenschaften wie z. B. die Viskosität (bei 100°C), der Aschegehalt oder der Glührückstand von Bedeutung sind. Da sie kaum als „Baustoff“ verwendet werden, sind ihre vielfältigen physikalisch-mechanischen bzw. „bautypischen“ Eigenschaften, wie die Druckfestigkeit, der Elastizitätsmodul, die Biegefestigkeit und das plasto-elastische bzw. viskoelastische Verhalten, weithin unbekannt bzw. werden durch die Wachshersteller erst gar nicht ermittelt und angegeben. Die wenigen „bautypischen“ Eigenschaften der Wachse, welche durch die Wachshersteller genannt werden, sind die Nadelpenetrationshärte nach DIN 51579 [130], der Erstarrungspunkt nach DIN ISO 2207 [131] und der Tropfpunkt nach DIN ISO 2176 [132].

Da aus diesen Gründen keine zufriedenstellende Auswahl an geeigneten Wachsen, basierend auf den spezifizierten physikalisch-mechanischen und weiteren Anforderungen (Tabelle 6), getroffen werden kann, wurden die Anforderungen in diversen persönlichen Gesprächen mit verschiedenen Wachsherstellern diskutiert. In diesen Abstimmungen wurden gemeinsam die in Tabelle 7 dargestellten vereinfachten Anforderungen festgelegt:

<sup>13</sup> Beim Überschreiten der Glasübergangstemperatur  $T_G$  geht ein festes Glas oder Polymer in einen gummiartigen bis zähflüssigen Zustand über.



Tabelle 7: Vereinfachte Anforderungen für Wachse als Schalungsmaterial

<b>Erstarrungspunkt <math>E_P</math> [131]</b>	> 60°C	um möglichst eine Glasübergangstemperatur (TG) von über 40°C zu gewährleisten
<b>Nadelpenetrationshärte [130]</b>	< 10 [1/10 mm]	Durch die Kohärenz zwischen Härte und Festigkeit wird erwartet, dass dieser Wert Wachse ausschließt, die zu weich sind, also eine zu geringe Festigkeit aufweisen.
<b>Thermische Volumenausdehnung</b>  <b>Tropfpunkt (TP)</b>	mögl. gering  < 150°C	Da der thermische Volumenausdehnungskoeffizient (Schrumpf) mit steigendem Schmelz- bzw. Tropfpunkt zunimmt, sollte aus diesem Grund der Tropfpunkt bei weniger als 150°C liegen. Zudem nimmt die Schmelzenthalpie / -energie [J/g] prinzipiell mit steigendem Tropfpunkt zu, weswegen dieser ebenfalls begrenzt werden sollte.
<b>Öligkeit bzw. Ölgehalt</b>	mögl. gering	da dieser maßgebend für die Klebrigkeit des Wachses ist; damit das Wachs sauber geätzt werden kann

### 3.3 Analyse und Selektion geeigneter Wachse als Schalungsmaterial

#### 3.3.1 Auswahl der potentiell geeigneten Wachse

Tabelle 8: Übersicht der als prinzipiell geeignet eingestuften Wachse von unterschiedlichen Wachsherstellern

Nr.:	Wachshersteller	Wachsbezeichnung	Abkürzung	TP Tropf- punkt [°C]	EP Erstar- rungspunkt/ - bereich [°C]	N-PEN bei 25°C [1/10 mm] [130]
#1	H&R Wasag AG 20457 Hamburg	H&R Wax 64/66	HR64-66	k. A.	ca. 65	19
#2		H&R Wax 60/62 321	HR60-62	k. A.	ca. 61	15
#3		H&R Wicrofin 74	HR-Wic	k. A.	ca. 72	20
#4	Kahl GmbH & Co. KG 22946 Trittau	Kahlwax® 2811	KW2811	79	k. A.	k. A.
#5		Kahlwax® 4180	KW4180	112	k. A.	k. A.
#6		Kahlwax® 5023	KW5023	83	79	k. A.
#7		Kahlwax® 6607L	KW6607L	75	k. A.	k. A.
#8	Wachs- & Ceresin-Fabriken Th. C. Tromm GmbH 50735 Köln	ConFormWax®	CFW	73–79	62–66	3–5
#9		POLARWACHS® 30 839	PW	110–121	k. A.	ca. 1
#10		POLYCERIT® N 174	PC	117–122	k. A.	k. A.
#11	ROMONTA GmbH 06317 Arnsdorf	PW 3119	PW3119	97	k. A.	4,1
#12		PW 3139	PW3139	110	k. A.	3,6
#13		PW 3146* <sup>1</sup>	PW3146 * <sup>1</sup>	98	k. A.	2,5
#14		Romocast 253* <sup>1</sup>	RC253* <sup>2</sup>	76	k. A.	2,5
#15		Romocast 252* <sup>1</sup>	RC252* <sup>1</sup>	80	k. A.	2,0
#16	Sasol Wax GmbH 20457 Hamburg	Sasol Wax® 6403	SSW1	k. A.	63–66	16–20
#17		Sasol Wax® 3279	SSW2	80–86	76–82	14–18
#18		Sasol Wax® c80	SSW3	k. A.	78–83	0–7
#19	CLARIANT Wax über Ter Hell & Co. GmbH 20457 Hamburg	Licocene® PP 1302 Gr	LIC1302	ca. 90	k. A.	k. A.
#20		Licocene® PP 1602 Gr	LIC1602	ca. 88	k. A.	k. A.
#21		Licocene® PP 2602 Gr	LIC2602	ca. 99	k. A.	k. A.
#22		Licocene® PP 6102 Gr	LIC6102	ca. 145	k. A.	k. A.
#23	Völpker Spezialprodukte GmbH 39393 Völpke	Völpker® 4706	VOE4706	73–78	ca. 50	k. A.
#24		Völpker® 6628	VOE6628	65–75	57–63	k. A.
#25		Völpker®8014	VOE8014	70–80	65–70	< 10
#26		Völpker ®6548 V2	VOE6548- V2	k. A.	102,6	k. A.
#27	Paramelt, Sales office Germany 20457 Hamburg	MACO (EU)	MACO	66–76	ca. 60	ca. 10
#28	MORSA Wachs f. Sallinger GmbH 86831 Krumbach	Wax eco Fräswachs	MORFr	80–130	k. A.	k. A.
#29	Steinhard Wachswerke 86381 Krumbach	Steinhart 60 rot	SH	k. A.	ca. 60	k. A.

\* Wachs ist werkseitig mit Terephthalsäure als Füllstoff versetzt: \*<sup>1</sup> 40 Gew.-% / \*<sup>2</sup> 25 Gew.-%

Basierend auf den vereinfachten Anforderungen aus Kapitel 0 und den Empfehlungen der Wachshersteller wurden die in Tabelle 8 dargestellten Wachse für die Grundlagenuntersuchungen ausgewählt und jeweils als Wachsmuster dem ITE zur Verfügung gestellt (Datenblätter der Wachse Anhang B).

#### 3.3.2 Vorauswahl der Wachse hinsichtlich ihrer Zerspanbarkeit (Fräsbarkeit)

Die Fräsbarkeit<sup>14</sup> eines Wachses stellt, neben seinen physikalisch-mechanischen Eigenschaften, die wichtigste Voraussetzung für seine Anwendung als Schalungsmaterial für die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie dar. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Schritt alle 29 durch die Wachshersteller zur Verfügung gestellten Wachse (Tabelle 8) in Vorversuchen hinsichtlich ihrer Fräsbarkeit untersucht. Die im Versuchsprotokoll zur Überprüfung der Fräsbarkeit von unterschiedlichen Wachsen (Anhang C) detailliert dargestellten Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

Alle 29 Wachse wurden jeweils etwa auf  $+10^{\circ}\text{C}$  über ihrem angegebenen Tropfpunkt  $T_P$  erwärmt und jeweils im flüssigen Zustand in eine filmbeschichtete Furniersperrholzschalung mit einer Grundfläche von 120 mm x 120 mm und einer Höhe von 50 mm gegossen. Die Furniersperrholzbodenplatte (Trägerplatte) ist dabei jeweils mit 4 Holzschrauben von unten her durchgeschraubt, wobei die herausstehenden, etwa 10 mm langen Schraubenspitzen zwischen der Trägerplatte und dem abkühlenden Wachs eine mechanische Verbindung herstellen. Nach dem Abkühlen des Wachses auf etwa  $20^{\circ}\text{C}$  wurden die Wachsblöcke ausgeschalt und auf ihrer Trägerplatte in einer 3 Achs Modellbaufräse Typ Roland Modela MDX 40 aufgespannt. Anschließend wurde in die jeweiligen Wachsblöcke die in Abbildung 3-7 dargestellte Referenzgeometrie mit unterschiedlichen geometrischen Herausforderungen bei etwa  $20^{\circ}\text{C}$  Umgebungstemperatur in 3 Schritten (Plan, Schrupp- und Schlichtbearbeitung) mit einem Einzahnfräser der Firma VHF Typ ES-SC-0600-6-250-60 SHC gefräst.

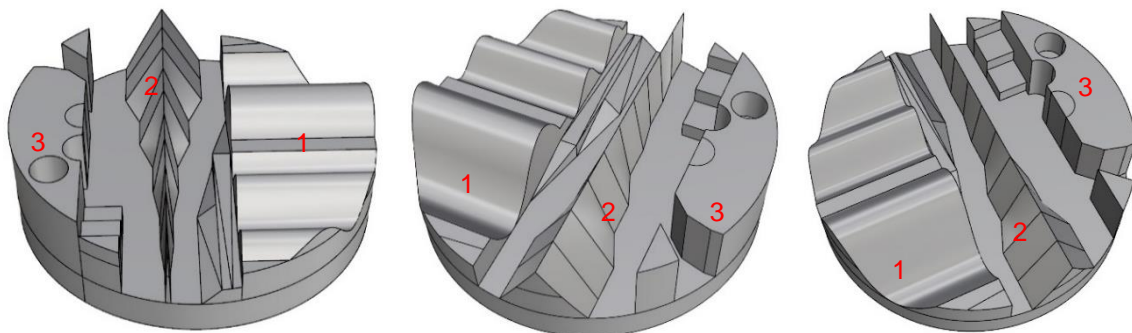


Abbildung 3-7: Perspektivische Visualisierung der Referenzgeometrie, Durchmesser 100 mm / Höhe 30 mm, zur Überprüfung der Fräsbarkeit unterschiedlicher Wachse: geometrische Bereiche: 1) amorphe, parabelförmige, unidirektional gekrümmte Flächen, 2) mit unterschiedlichen Winkeln von  $5^{\circ}$  auf  $60^{\circ}$  zulaufender scharfer Grat, 3) Stufen, Zylinderbohrungen und Dreieckszylinder mit scharfen Kanten

Die durchgeführten Versuche zur Überprüfung der Fräsbarkeit von 29 unterschiedlichen Wachsen anhand der Referenzgeometrie ergaben dabei, dass sich die untersuchten Wachse hinsichtlich ihrer Fräsbarkeit generell, wie in Abbildung 3-8 beispielhaft dargestellt, in die folgenden drei Gruppen einteilen lassen: 1. **geeignet** (also fräsbar), 2. **zu spröde** und 3. **zu klebrig**.

<sup>14</sup> Fräsbarkeit bzw. Zerspanbarkeit ist die Fähigkeit eines Materials, durch einen rotierenden, mit Schneiden besetzten Fräskopf durch Zerspanung überflüssigen Materials in eine bestimmte Form gebracht zu werden



Abbildung 3-8: Beispiele für die unterschiedlichen Gruppen von Wachs, an welchen die Zerspanungsfähigkeit (Fräsbarkeit) mittels einer Referenzgeometrie untersucht wurde: 1. geeignetes, also gut fräsbares bzw. spanendes Wachs, Fa. Tromm ConCormWax CFW (links), 2. Wachs ist für die spanende Bearbeitung nicht geeignet, da zu spröde, VÖLPKER 6628 (Mitte), 3. Wachs ist für die spanende Bearbeitung nicht geeignet, da zu klebrig, H&R Wicrofin 74 (rechts)



Abbildung 3-9: Gefräste Referenzkörper (inkl. Vergleichsprobe) der untersuchten Wachse: links zu spröde (Wachs KW5023, nur Vergleichsprobe dargestellt), mittig prinzipiell für die Fräsbearbeitung geeignet und rechts zu klebrig (Wachs MACO, nur Vergleichsprobe und SH nicht dargestellt)

Die in Abbildung 3-9 rechts dargestellten 10 untersuchten Wachse: **HR 64-66 (#1)**, **HR 60-62 (#2)**, **HR-Wic (#3)**, **SSW1 (#16)**, **SSW2 (#17)**, **LIC 1302 (#19)**, **LIC 1602 (#20)**, **LIC 2602 (#21)**, **MACO (#27)** und **SH (#29)** wurden als „zu klebrig“ für die Fräsbearbeitung und somit als ungeeignet für die Anwendung als Schalungsmaterial eingestuft. Ein sauberes Schneiden bzw. Zerspanen dieser Wachse mit einem Fräser und die Erzeugung von Frässpänen, die abgeführt werden konnten, war dabei nicht möglich und es kam vornehmlich zu einem Zusetzen des Fräswerkzeuges. Zudem hafteten die Späne bzw. Wachsabbrüche stark an der bereits gefrästen Oberfläche und führten somit zu deren Verunreinigung und zu einer Doppelzerspanung, d. h. einem Wiederandrücken der Späne durch den Fräskopf beim Fräsen. Werden die Eigenschaften dieser zu klebrigen Wachse betrachtet, wird deutlich, dass dieses Phänomen nicht von der Temperatur (Tropfpunkt (TP) – bzw. Erstarrungspunkttemperatur (EP)), sondern stark von der Weichheit bzw. Nadelpenetrationshärte der Wachse abhängt. Eine Nadelpenetrationshärte über 10 [1/10 mm] impliziert somit, wie vorab angenommen, aber dennoch von einigen Wachsherstellern bestritten, eine schlechte Fräsbarkeit bzw. eine zu hohe Klebrigkeit der Wachse.

Die in Abbildung 3-9 links dargestellten 9 untersuchten Wachse: **KW 2811 (#4)**, **KW 4180 (#5)**, **KW 5023 (#6)**, **KW 6607L (#7)**, **VOE 4706 (#23)**, **VOE6628 (#24)** und **VOE 8014 (#25)** wurden als „zu spröde“ für die Fräsbearbeitung und somit ebenfalls als ungeeignet für die Anwendung als Schalungsmaterial eingestuft. Zwar ließen sich diese Wachse ohne ein Zusetzen bzw. Verkleben des Fräasers bearbeiten, viele Wachse zeigten aber bereits nach dem Gießen des Rohlings unterschiedlich starke thermisch bedingte Fehlstellen wie z .B. Risse und Hohlräume. Diese Fehlstellen begünstigten

den starken Hang dieser zu spröden Wachse zu einem leichten Auseinander- oder Abbrechen unterschiedlicher gefräster Elemente und Kanten der Referenzgeometrie. Zudem wird durch diese Fehlstellen eine unzureichende Oberflächenqualität erreicht, da sich z. B. die Risse an der Oberfläche des Wachses am Beton abzeichnen oder zu einem Ausbluten des Betons (Verlust von Wasser aus dem Frischbeton durch die Risse) führen könnten. Obwohl dies nicht eindeutig quantifizierbar ist, scheint eine zu hohe Härte der Wachse (N-PEN unter 1 [1/10 mm]) zu einem zu spröden Verhalten zu führen und ein Indikator für eine ungünstige generelle Fräsbarkeit zu sein.

Die in Abbildung 3-9 mittig dargestellten 10 Wachse: **CFW (#8), PC (#10), PW 3119 (#11), PW 3139 (#12), PW 3146 (#13), RC 253 (#14), RC 252 (#15), SSW 3 (#18), VOE 6548-V2 (#26) und MORFr (#28)** zeigen eine gute Fräsbarkeit und somit eine prinzipielle Eignung als Material für effizient herzustellende, CNC gefräste hochpräzise freigeformte Schalungen für Betonkörper. Weder kam es bei diesen 10 prinzipiell geeigneten Wachsen zu einem Zusetzen des Fräasers noch zu einer Störung des Gefüges durch Fehlstellen. Bei all diesen Wachsen konnte die komplexe Referenzgeometrie komplett mit einer jeweils zufriedenstellenden Oberflächenqualität und scharfen Kanten (bis auf die erwarteten Einschränkungen an der Spitze des kleinsten 5° Winkels) detailgetreu gefräst werden. Ein bemerkenswerter Unterschied bei diesen gut fräsbaaren Wachsen konnte in der beim Fräsen entstehenden Form der Späne beobachtet werden. Bei Wachsen höherer Härte und bei solchen, die werkseitig mit dem Füllstoff Terephthalsäure<sup>15</sup> angereichert sind, waren die entstehenden Späne sehr fein und ähnelten Staub, welcher sich aufgrund seiner Feinheit in der gesamten Fräse verteilt und besonders an den Gestängen und Antrieben agglomert hat. Da dieser Staub ggf. atemwegsreizende Eigenschaften besitzen und zu einem höheren Reinigungsaufwand bzw. Verschleiß der Fräsmaschine führen könnte, sollte die entstehende Spanform als zusätzliches finales Auswahlkriterium für ein geeignetes Wachs herangeführt werden.

Zusammenfassend haben diese Versuche gezeigt, dass sich Wachse stark in ihrer Fräsbarkeit unterscheiden und dass die Härte eines Wachses maßgebend für seine Fräsbarkeit verantwortlich zu sein scheint. Eine zu große Härte führt dabei anscheinend zu einer starken Anfälligkeit für ungewollte Sprödebrüche und somit zu einer verminderten Robustheit. Eine zu niedrige Härte bewirkt das Zusetzen des Fräasers und eine Anhaftung der Späne an den gefrästen Oberflächen. Ein effizient fräsbares, als Schalungsmaterial geeignetes Wachs sollte daher in seiner Härte genau abgestimmt sein: hart genug, um ohne Verkleben des Fräasers bearbeitet werden zu können, und weich genug, um den mechanischen Belastungen durch den Fräser standhalten zu können, ohne dabei ungewollte spröde Materialabbrüche zu erleiden.

---

<sup>15</sup> Terephthalsäure: chem. Bezeichnung für Benzol-1,4-dicarbonsäure (Summenformel  $C_8H_6O_4$ ); dient hauptsächlich als Füllstoff zur Herstellung von Polyestern wie Polyethylenterephthalat (PET) und kann in toxikologischer Hinsicht eine schwache Reizung auf die Augen, Schleimhäute und Atemwege bewirken [138].



#### 3.3.3 Ermittlung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Wachse

Für die in Kapitel 3.3.2 ausgewählten fräsbaren, prinzipiell als Schalungsmaterial geeigneten Wachse **CFW (#8)**, **PC (#10)**, **PW 3119 (#11)**, **PW 3139 (#12)**, **PW 3146 (#13)**, **RC 253 (#14)**, **RC 252 (#15)**, **SSW 3 (#18)**, **VOE 6548-V2 (#26)** und **MORFr (#28)**

werden nach Möglichkeit in den folgenden Grundlagenuntersuchungen unterschiedliche physikalisch-technische Eigenschaften ermittelt. Diese ermittelten Eigenschaften werden abschließend mit den gestellten Anforderungen an ein geeignetes Wachs für die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie verglichen, um so ein oder mehrere optimal geeignete Wachse als Schalungsmaterial für freigeformte Betonbauteile auswählen zu können. Zudem dienen die ermittelten Eigenschaften als spätere Grundlage u. a. für numerische Simulationen des Fräsvorganges, für die Verformungsberechnung der Schalungsteile und für die ökologische und ökonomische Bilanzierung.

Das Wachs Wax eco Fräswachs mit der Kurzbezeichnung MORFr (#28) der MORSA Wachsfabriken Sallinger GmbH wurde dabei aufgrund seiner verhältnismäßig hohen Kosten in den nachfolgenden Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

##### 3.3.3.1 DSC: dynamische Differenzkalorimetrie

Für die Untersuchung der ausgewählten 9 Wachse wurde das Dynamische Differenzkalorimeter (englisch differential scanning calorimetry DSC) Typ Netzsch DSC 204 des Instituts für Technische Chemie (ITC), Abt. Makromolekulare Stoffe der Technischen Universität Braunschweig von Prof. Dr. Henning Menzel mit dessen freundlicher Unterstützung verwendet. Basierend auf den Empfehlungen des ITC wurden je etwa 10 mg Wachsproben im DSC von -10°C bis auf 150°C (Heizrate 10 K/min) aufgeheizt und mit einer Abkühlrate von 20 K/min wieder abgekühlt (Abbildung 3-10). Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit und dem Ausschluss der „thermischen Vorgeschichte“ wurden alle Proben jeweils zweifach aufgeheizt und abgekühlt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt.

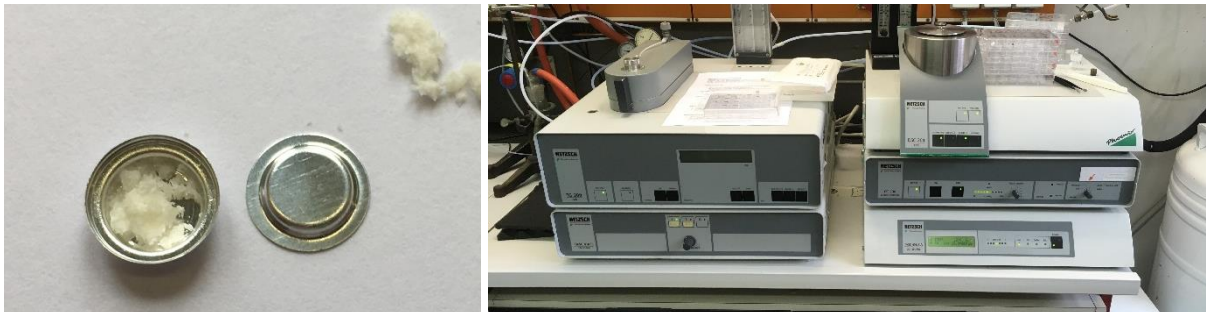


Abbildung 3-10: Vorbereitung des Schmelztiegels mit 10 mg CFW Wachs (links), Dynamisches Differenzkalorimeter (DSC) Typ Netzsch DSC 204 am Institut für Technische Chemie (rechts)

Bei der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) handelt es sich um ein relativ standardisiertes Verfahren der thermischen Analyse zur Messung von abgegebener oder aufgenommener Wärmemenge einer Probe bei Aufheizung, Abkühlung oder einem isothermen Prozess. Die kalorimetrischen Untersuchungen basieren dabei auf der grundlegenden kalorimetrischen Gleichung (hier: konstanter Druck):

$$\Delta Q = C_p \times \Delta T \quad (2)$$

und erlauben die Bestimmung einer ausgetauschten Wärmemenge  $\Delta Q$  [J/kg] und der spezifischen Wärmekapazität  $C_p$  [J/(kg·K)] eines Systems bei der Kenntnis der jeweils anderen Größe und der Messung von  $\Delta T$  [K]. Im hier betrachteten Fall werden mit den kalorimetrischen Messungen die thermischen Eigenschaften der Wachse bezüglich der abgegebenen oder aufgenommenen Wärmemenge bei Aufheizung und Abkühlung als Differenz des Wärmestroms zur Probe und eine

Referenz als Funktion der Temperatur aufgezeichnet. Aus dem DSC Wert [mW/mg] der Messung kann über Betrachtung der jeweiligen Heizrate (hier 6 sec/K) der  $C_p$  Wert des Wachses in Abhängigkeit der Temperatur  $T$  ermittelt werden. Am Verlauf des DSC Graphen (spezifische Wärmekapazität über die Temperatur) lassen sich zudem relevante endotherme Prozesse (z. B. der Glasübergang und das Schmelzen) und exotherme Prozesse (z. B. die Kristallisation) identifizieren, für welche materialabhängige charakteristische Temperaturen abgelesen bzw. ermittelt werden. Zur Ermittlung dieser charakteristischen Temperaturen werden u. a. Hilfsgeraden erstellt, die entweder als Wendetangenten an die Peakflanken oder als extrapolierte Ausgleichsgeraden der Anfangs- bzw. Endbasislinien eingezeichnet werden. Die Schnittpunkte dieser Geraden ergeben z. B. die charakteristischen Temperaturen eines Peaks [133].

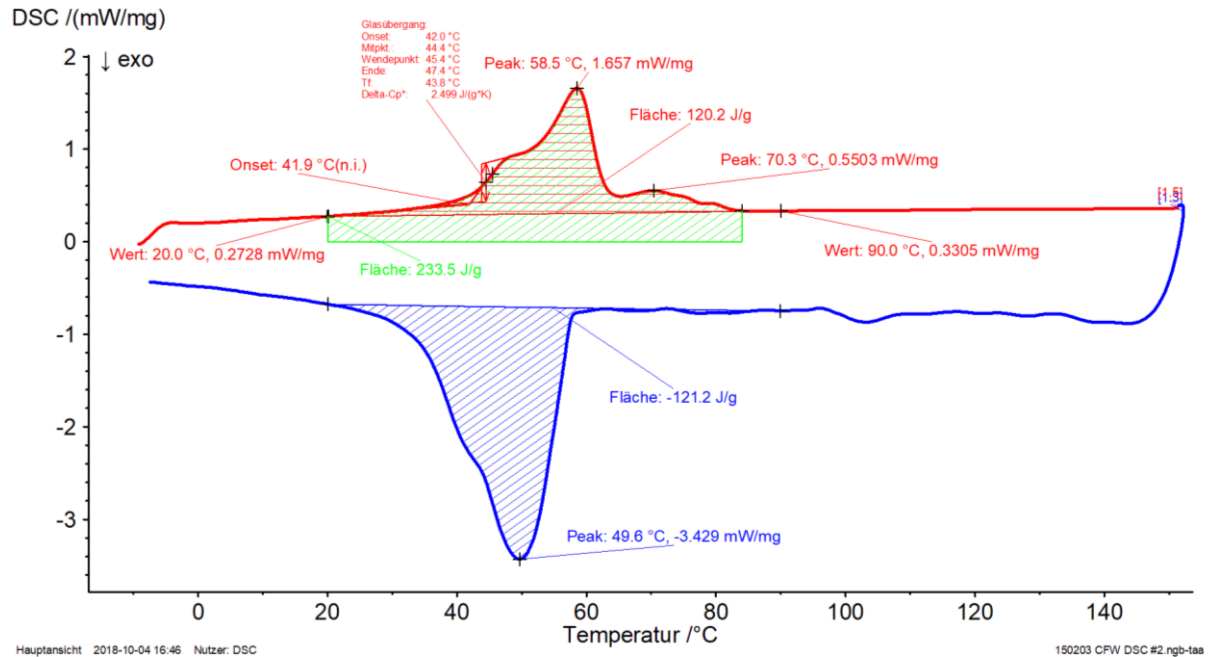


Abbildung 3-11: Wachs CFW - DSC Graph der aufgenommenen und abgegebenen Wärmeenergie je Temperatur, rot Aufheizung, blau Abkühlung

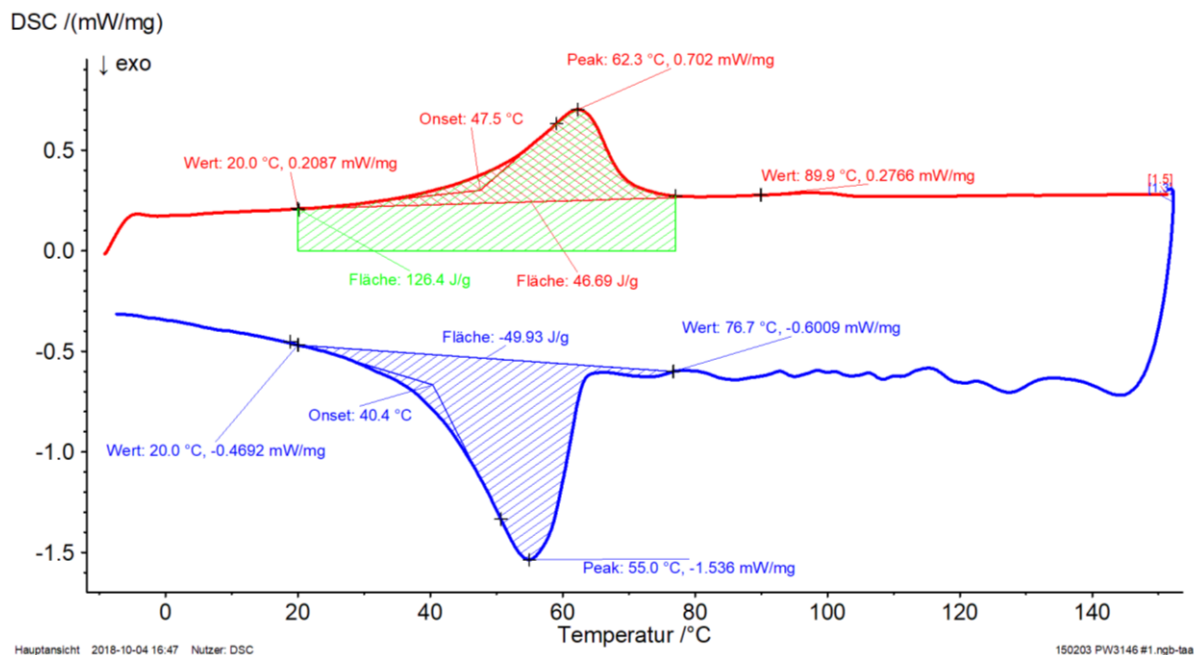


Abbildung 3-12: Wachs PW 3146 - DSC Graph der aufgenommenen und abgegebenen Wärmeenergie je Temperatur, rot Aufheizung, blau Abkühlung

#### DSC Schmelzpeak

Der DSC Schmelzpeak der Aufheizkurve (z. B. Abbildung 3-12 bei 62,3°C) wird bei thermoplastischen Kunststoffen in der Literatur oft als Schmelztemperatur  $T_s$  angesehen und der DSC Abkühlpeak (z. B. Abbildung 3-12 bei 55°C) als Kristallisationstemperatur  $T_k$ , wobei diese bei Wachsen in ein mehr oder weniger breites und unscharfes Schmelzintervall [126] verschwimmen (vergl. 3.1.3). Die Peaks der Heiz- und Kühlkurven (bzw. die Verläufe der Enthalpie) sind aufgrund der sekundären als auch molekularen Keimbildungen, welche nur während des Kristallisierens bzw. Abkühlens auftreten, zueinander verschoben. Dadurch liegt die Kristallisationstemperatur im Vergleich zur Schmelztemperatur bei niedrigeren Temperaturen. Zudem ist der Kristallisationsgrad stark von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Wie beim CWF (Abbildung 3-11) können dabei auch mehrere unterschiedlich starke DSC Schmelzpeaks auftreten, die auf einen Wachscompound, also ein Gemisch aus verschiedenen Einzelwachsen, schließen lassen.

#### DSC Onset-Wert / Glasübergang

Anhand der DSC Kurve ist es ebenfalls möglich, die Glasübergangstemperatur  $T_g$  (auch Erweichungstemperatur oder -bereich EB) als charakteristische Temperatur zu ermitteln. Wie beim Wachs CFW zu sehen ist (Abbildung 3-11, Aufheizkurve zwischen 40°C und 50°C), erscheint der Glasübergang dabei wie ein thermischer Übergang 2. Ordnung (stufenartige Änderungen der Basislinie), ist aber dennoch kein thermischer Übergang, d. h. kein Gleichgewichtsübergang. Bei den teilkristallinen Materialien wie Wachsen wird dieser Bereich oft durch den Schmelzpeak überlagert und ist daher nicht eindeutig zu erkennen. Vereinfacht kann daher der angegebene DSC Onset-Wert der Aufheizkurve als charakteristische Temperatur des Beginns einer starken Erweichung herangezogen und somit als obere Grenze des thermischen Gebrauchsbereichs eines Wachses angesehen werden.

Obwohl die DSC Messungen exakte Peak- und Onset-Werte liefern, können diese nach [133] für z. B. Paraffine einer starken Streuung unterliegen und sollten daher besonders für Wachse nur als Richtwerte betrachtet werden. Begründet liegt dieses in der geringen Wärmeleitfähigkeit von Wachsen (reines Paraffin laut Literatur etwa  $\lambda = 0,2 \text{ W/mK}$ ), wodurch sich in den Proben selbst, je nach gewählter Heizrate, unterschiedliche Temperaturgradienten ausbilden, deren Einfluss nicht vom Messgerät erfasst werden kann. So werden die temperaturabhängigen Verläufe der spezifischen Wärme mit zunehmender Heizrate zu immer höheren Temperaturen verschoben und zudem bei starken Abkühlraten die Kristallbildung zu Gunsten amorpher Phasen behindert. Für zukünftige DSC Messungen an Wachsen wird daher empfohlen, die Heiz- und Abkühlrate möglichst gering ( $< 5 \text{ K/min}$ ) zu wählen.

#### DSC Schmelzenthalpie

Durch Integration der Fläche unter dem Verlauf der spezifischen Wärmekapazität  $C_p$  (Aufheizkurve) über die Temperatur  $T$  kann für die jeweiligen Wachse die notwendige Gesamtenergie als Summe der Energie zum Erwärmen  $E_W$  und für die Phasenumwandlung  $E_{Ph}$  (fest / flüssig) berechnet werden. Im Kontext dieser Arbeit wird diese notwendige Gesamtenergie vereinfacht als Gesamtschmelzenergie  $E_{Schm}$  (Schmelzenthalpie) bezeichnet und beschreibt die notwendige Energie, um ein Wachs einzuschmelzen, also von 20°C Raumtemperatur bis zum Vorliegen von Schmelze zu erwärmen. Bezogen auf das Wachs CFW (Abbildung 3-11) ist  $E_{Schm}$  als grün schraffierte Fläche (233,5 J/g) und  $E_{Ph}$  als rot schraffierte Fläche (120,2 J/g) dargestellt. Basierend auf der so ermittelten Gesamtschmelzenergie  $E_{Schm}$  können die jeweiligen Schmelzenergiekosten ( $E_{kSchm}$ ) der Wachse für das Recycling berechnet werden, welche Eingang in Formel (1) zur Ermittlung der Materialkosten des Wachses je Einsatz ( $WAX_{jE}$ ) finden.

Tabelle 9: Relevante Ergebnisse der DSC Analyse für die 9 ausgewählten Wachse

Wachs	Tropfpunkt/ -bereich [°C] (Datenblatt)	DSC Onset [°C] Aufwärm- kurve	DSC Schmelzpeak [°C]	DSC Abkühlpeak [°C]	DSC Energie Phasenum- wandlung $E_{Ph}$ [J/g]	DSC Gesamt- schmelz- energien $E_{Schm}$ [J/g]
CFW	73–79 EP (62 - 66)	41,9	58,5	49,6	120,2	233,5
PC	117–122	61,1	93,7 & 113,8	98,2	143,6	368,7
PW 3119	97	67,5	81,8	71,1	199,6	373,5
PW 3139	110,4	72,3	108,5	93,7	118,9	267,0
PW 3146	98,1	47,5	62,3	55	46,69	126,4
RC 253	76,3	41,4	61,3	55,2	61,95	157,0
RC 252	80,1	38,6	58,1	54,3	58,17	169,2
SSW3	EP (78–83)	70,8	85,6	71,4	225,3	381,8
VOE6548-V2	EP (102,6)	38,1 & 93,9	54,9 & 99,9	47,7 & 83,1	122,8	295,4

Tabelle 9 zeigt die für die spätere Wachsauswahl aus den DSC Messungen ermittelten relevanten Werte. Beim Vergleich der ermittelten Schmelzenenergien  $E_{Schm}$  wird dabei deutlich, dass diese für die Wachse stark variieren und z. B., bezogen auf das Wachs PW 3146, das Wachs SSW3 etwa das 3-fache an Energie zum Schmelzen benötigt. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Wachse PW 3146, RC 252 und RC 253 (vergl. Tabelle 8) mit bis zu 40 % Terephthalsäure als Füllstoff versetzt sind und somit deutlich weniger Energie zum Schmelzen benötigen als Wachse ohne Füllstoffe, da die Füllstoffe selbst i. d. R. keine Energie zur Phasenumwandlung benötigen. Für Wachse ohne Füllstoff erscheint die Schmelzenenergie von etwa 233,5 J/g für CFW als ein geringer Wert. Werden der DSC Schmelzpeak und die Schmelzenenergie verglichen, kann (mit Ausnahme von SSW3 und PW 3119) eine prinzipielle Korrelation zwischen den Werten festgestellt werden. Mit steigendem DSC Schmelzpeak nimmt also auch prinzipiell die für das Schmelzen der Wachse erforderliche Schmelzenthalpie bzw. Schmelzenenergie zu. Bezüglich des DSC Onset-Wertes der Aufwärmkurve scheinen die Wachse bis auf RC 252 alle über 40°C zu liegen und somit einen prinzipiell günstigen thermischen Gebrauchsbereich hinsichtlich der Anforderungen für Wachse als Schalungsmaterial zu besitzen (vergl. Tabelle 7). Werden die aus den Datenblättern bekannten Tropf- bzw. Erweichungstemperaturen (thermische Kennzahlen) der Wachse mit den aus der DSC Messung ermittelten DSC Schmelzpeaks verglichen (Tabelle 9), wird deutlich, dass zwischen diesen Werten zwar eine Korrelation besteht, aber keine eindeutige Abhängigkeit abzuleiten ist. Nach [134] ist dieses darauf zurückzuführen, dass z. B. bei der Tropfpunktbestimmung neben der physikalischen Schmelze noch die temperaturabhängige Viskosität erfasst wird, wohingegen die DSC nur die reine Wärmeaufnahme für das Schmelzen z. B. der Kristallite berücksichtigt. Besonders deutlich wird dieses bei den mit 40 % Terephthalsäure als Füllstoff versetzten Wachsen PW3146 und RC 252, bei welchen der Füller die Viskosität und somit die Diskrepanz zwischen Tropfpunkt und DSC Schmelzpeak erhöht. In Anhang D sind die DSC Graphen aller 9 untersuchten Wachse aufgeführt.

### 3.3.3.2 Wärmeleitfähigkeit

Nach [124] sind Kunststoffe wegen ihrer eingeschränkten thermischen Beweglichkeit schlechte Wärmeleiter. Die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) dichter Kunststoffe liegt dabei im Bereich zwischen 0,15 und 0,58 W/mK und kann bei Kunststoff-Schaumstoffen bis zu 0,03 W/mK heruntergehen. Da das Wissen um die Wärmeleitfähigkeit der ausgewählten Wachse u. a. für eine Berechnung ihrer Erwärmung bzw. die Ableitung der aus der Hydratation entstehenden Wärme durch die Schalung benötigt wird, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Wachse bestimmt. Für die Untersuchung der ausgewählten Wachse wurde das Transient-Hot-Bridge Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Pausch THB-10 des Fraunhofer-Instituts für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), in Braunschweig mit freundlicher Unterstützung durch Prof. Dr. Kasal verwendet. Als Probekörper wurden jeweils zwei Wachsplatten mit den Abmessungen 200 x 150 mm gegossen und auf eine Solldicke von 25 mm plangefräst. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-13 dargestellt. Die Temperatur der Probekörper betrug etwa 20°C, der Messstrom 60 mA, die Messdauer 88 s und es wurden je Messung 60 Messergebnisse aufgenommen und gemittelt.

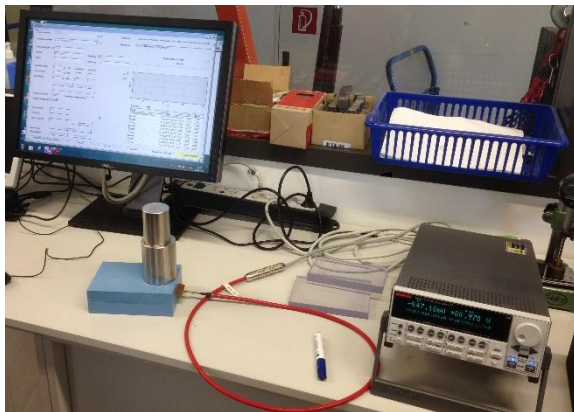


Abbildung 3-13: Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Pausch THB-10 bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung vom Wachs PW 3146

Tabelle 10: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung mittels Pausch THB-10

Wachs	Wärmeleitfähigkeit WLF $\lambda$ in [W/mK]		
	Messung A:	Messung B:	Mittelwert:
CFW	0,196	0,192	<b>0,194</b>
PC	0,334	0,345	<b>0,339</b>
PW 3119	0,341	0,342	<b>0,341</b>
PW 3139	0,354	0,359	<b>0,356</b>
PW 3146	0,404	0,468	<b>0,436</b>
RC 253	0,342	0,325	<b>0,334</b>
RC 252	0,370	0,375	<b>0,373</b>
SSW 3	0,310	0,336	<b>0,323</b>
VOE 6548-V2	0,314	0,329	<b>0,321</b>

Die Ergebnisse der jeweils zweifach durchgeführten Messungen sind in Tabelle 10 dargestellt und liegen im erwarteten Bereich thermoplastischer Kunststoffe. CFW zeigte dabei die mit Abstand geringste WLF, liegt aber dennoch am nächsten an dem für Paraffine in [133] angegeben Richtwert von 0,2 W/mK. Die WLF der übrigen ungefüllten Wachse liegt höher im Spektrum zwischen 0,32 und 0,35 W/mK. Eine geringfügig höhere WLF zeigen lediglich die Wachse PW 3146 und RC 252, welches sich auf den mit 40 Gew.-% enthaltenen Füllstoff Terephthalsäure zurückführen lässt.

### 3.3.3.3 Rohdichte und thermische volumenspezifische Ausdehnung

Nach [124] zeigen Kunststoffe wie auch Wachse aufgrund ihrer Struktur eine verhältnismäßig große thermische volumenspezifische Ausdehnung. Grundsätzlich ist der thermische Wärmeausdehnungskoeffizient bei Kunststoffen und somit wohl auch bei Wachsen sehr hoch. Er liegt dabei etwa 10-fach höher als der von Stahl und Beton. Da die Rohlinge (Wachsblöcke) für die durch Fräsbearbeitung zu erstellenden Schalungen durch Gießen von heißem flüssigen Wachs hergestellt werden sollen, ist die Kenntnis des Wärmeausdehnungskoeffizienten bzw. der thermischen volumenspezifischen Ausdehnung der Wachse essenziell. Die thermische volumenspezifische Ausdehnung (in Vol.-%) vom festen Zustand bei 20°C zum flüssigen Zustand nahe ihres  $T_P$  sollte möglichst gering sein, da die beim Abkühlen entstehende Kontraktion (Schrumpf) zu Zwangsspannungen bzw. einem Aufreißen oder Verformen der Rohlinge führen kann. Zudem könnte sich aufgrund der entstehenden Hydratationswärme des Betons die Wachsschalung erwärmen und somit durch seine thermische Ausdehnung ungewollt stark verformen.

Gemäß [124] erfolgt die Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kunststoffen nach ISO 11359 [135] über die Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  (auch linearer Wärmeausdehnungskoeffizient oder Wärmedehnung). Da das Verfahren der DIN 53752 [136] mittels Quarzglas-Rohr-Dilatometer für Wachse im zu betrachtenden Temperaturbereich nicht anwendbar ist, wurde in einem ersten Ansatz das Verfahren zur „Volumenausdehnung von Paraffinen aus Steigrohr-Messungen“ nach [137] zur Bestimmung des temperaturabhängigen thermischen Raumausdehnungskoeffizienten  $\gamma$  (auch thermischer Volumenausdehnungskoeffizient) angewendet. Da sich bei Wachsen der thermische Volumenausdehnungskoeffizient über die Temperatur ändert, wird im Folgenden zur besseren Vergleichbarkeit die thermische volumenspezifische Ausdehnung zur Bezugstemperatur 20°C verwendet. Die auf Basis dieses Verfahrens in den Laboren des Instituts für Technische Chemie (ITC), Abt. Makromolekulare Stoffe der Technischen Universität Braunschweig, durchgeführten Versuche führten leider für die zu untersuchenden Wachse zu keinen verwendbaren Ergebnissen, da diese Methode nur für Wachse geeignet zu sein scheint, die bei niedrigen Temperaturen unter 60°C schmelzen.

Nach dem Scheitern des ersten Ansatzes wurde auf Empfehlung von Prof. Dr. Menzel ein zweiter Ansatz gewählt, welcher im Versuchsprotokoll „Rohdichte und thermische volumenspezifische Ausdehnung von Wachsen“ (Anhang E) im Detail dargestellt ist und wie folgt zusammengefasst werden kann: Die Rohdichte der Wachse wurde dabei nach dem Archimedisches Prinzip (AP) bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelt (Temperaturbereich 10 bis 60°C in Schritten von 10 K). Da die Rohdichtemessung von flüssigem Wachs mit der dafür verwendeten Waage nicht möglich ist, wurde die Rohdichte des flüssigen Wachses zusätzlich durch Wiegen eines bekannten Volumens an geschmolzenem Wachs durchgeführt. Aufgrund des Massenerhalts der Wachsproben konnten aus den bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelten Rohdichten der Wachse die in Tabelle 11 angegebenen und in Abbildung 3-14 dargestellten thermischen volumenspezifischen Ausdehnungen errechnet werden. Diese sind auf die jeweiligen gemittelten Rohdichten und die Bezugstemperatur 20°C normiert.

Da verfahrenstechnisch besonders die Volumenausdehnung der Schmelze selbst, nicht aber der Temperaturbereich zwischen 60°C und der Schmelze, von Interesse ist, wurden die Zwischenwerte, wie in Tabelle 11 kursiv dargestellt, durch lineare Interpolation errechnet.



### 3. Grundlagen, Analyse und Selektion geeigneter technischer Wachse als Schalungsmaterial

Tabelle 11: Thermische volumenspezifische Ausdehnung, normiert auf die jeweiligen gemittelten Rohdichten und die Bezugstemperatur 20°C [Vol.-%]

Temp in °C	CFW	PW 3146	RC 252	RC 253	PW 3139	VOE 6548	SSW3	PC
10	-0,40 %	-0,37 %	-0,33 %	-0,44 %	-0,82 %	-0,92 %	-0,74 %	-0,26 %
<b>20</b>	<b>0,00 %</b>	<b>0,00 %</b>	<b>0,00 %</b>	<b>0,00 %</b>	<b>0,00 %</b>	<b>0,00 %</b>	<b>0,00 %</b>	<b>0,00 %</b>
30	0,74 %	0,47 %	0,41 %	0,66 %	1,08 %	0,08 %	0,50 %	0,53 %
40	1,66 %	1,21 %	1,16 %	1,35 %	1,52 %	1,79 %	1,99 %	1,26 %
50	3,91 %	2,30 %	2,27 %	2,61 %	2,69 %	3,06 %	3,16 %	2,36 %
60	8,35 %	4,57 %	4,05 %	4,60 %	3,88 %	5,33 %	3,69 %	3,57 %
80	<b>11,91 %</b>	<b>6,97 %</b>	<b>6,57 %</b>	<b>7,70 %</b>	8,10 %	9,78 %	13,90 %	7,63 %
90					10,34 %	12,15 %	<b>19,80 %</b>	9,78 %
100					12,67 %	<b>14,62 %</b>		12,02 %
115					<b>16,36 %</b>			<b>15,56 %</b>

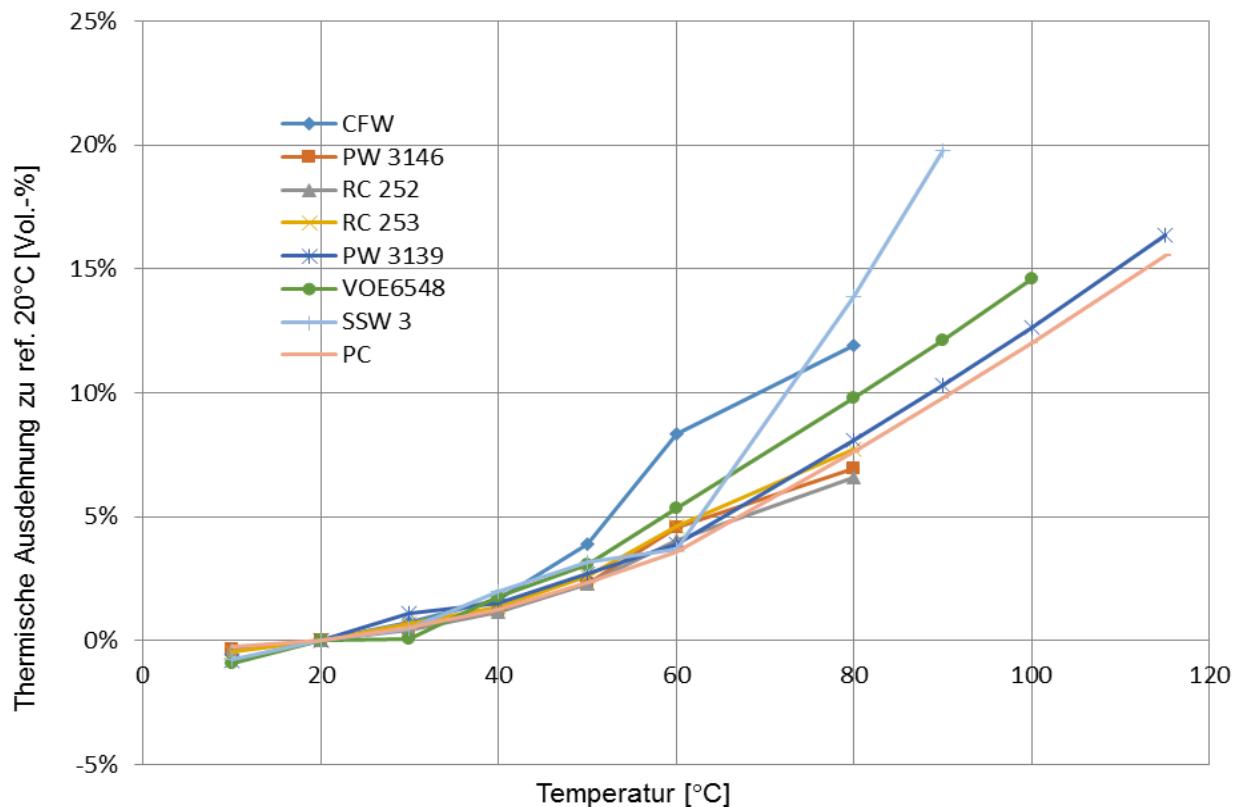


Abbildung 3-14: Diagramm: thermische volumenspezifische Ausdehnung, zur jeweiligen gemittelten Rohdichte und Bezugstemperatur 20°C normiert

Alle untersuchten Wachse zeigen bei Erwärmung die erwartete Abnahme der Rohdichte (Anhang E) und somit eine charakteristische thermische volumenspezifische Ausdehnung (Tabelle 11). Auffällig sind dabei die mit Terephthalsäure (Rohdichte von 1,51 g/cm<sup>3</sup> bei 20°C) angereicherten Wachse RC 253 (Füllstoffanteil 25 % – Rohdichte 1,1 g/cm<sup>3</sup>), PW 3146 und RC 252 (Füllstoffanteil 40 % – Rohdichte etwa 1,18 g/cm<sup>3</sup>), die eine deutlich erhöhte Rohdichte gegenüber z. B. CFW (Rohdichte 0,98 g/cm<sup>3</sup>) bei 20°C aufweisen.

Im unteren Temperaturbereich von 20°C bis etwa 40°C zeigen alle Wachse eine relativ geringe Ausdehnung (1,1 bis 2 Vol.-%), was sich nach [137] auf eine in diesem Bereich noch relativ feste

Kristallstruktur zurückführen lässt. Im oberen Temperaturbereich (bzw. vom festen Zustand (20°C) bis zu ihrem jeweiligen Schmelzpunkt) zeigen die Wachse eine deutlich größere, je nach Wachs unterschiedlich stark ausgeprägte volumenspezifische Ausdehnung, was sich auf das Lösen der kristallinen und amorphen Strukturen in der Schmelze zurückführen lässt.

Wie Tabelle 11 zu entnehmen ist, zeigen die mit Terephthalsäure angereicherten Wachse erwartungsgemäß die geringste volumenspezifische Ausdehnung der flüssigen im Vergleich zur festen Phase von nur 6,57 bis 7,70 Vol.-%, was sich auf die Eigenschaften der werkseitig zugefügten Terephthalsäure zurückführen lässt. Terephthalsäure selbst besitzt einen nur sehr geringen thermischen volumenspezifischen Ausdehnungskoeffizienten und geht beim Sublimationspunkt von 402°C direkt vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand über [138].

Bei den ungefüllten Wachsen zeigt CFW (bei 80°C) mit 11,91 Vol.-% die geringste volumenspezifische Ausdehnung im flüssigen Zustand, gefolgt von VOE 6548-v2 (bei 100°C) mit 14,62 Vol.-%, PC (bei 115°C) mit 15,56 Vol.-% und PW 3139 (bei 115°C) mit 15,56 Vol.-%. Mit Ausnahme des Wachses SSW 3 (bei 90°C) mit 19,80 Vol.-% Ausdehnung bestätigen diese Ergebnisse die Aussage von S. Oesterle in [51], dass „ein höherer Erweichungspunkt zu einer härteren Oberfläche, aber auch zu einem spröderen Wachs und einem höheren Grad an thermischer Schrumpfung“ führt.

Das Wachs PW 3119 sollte ursprünglich ebenfalls untersucht werden, musste aber von dem Versuch ausgeschlossen werden, da die damit hergestellten Probekörper auseinandergebrochen sind und das Wachs daher ebenfalls als zu spröde eingestuft wurde.

#### 3.3.3.4 Biegezugfestigkeit

Bei der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie soll das Wachs selbst vornehmlich als Schalungshaut und nur im gewissen Maße als Schalungsträger fungieren. Da das Wachs planmäßig (je nach Dicke und Form des Wachskörpers) durch eine das Wachs tragende Stahl- oder Holzträgerplatte gestützt wird, wird daher eher von einer aus dem Frischbeton resultierenden, reinen Druckbelastung und nur im geringen Maße von einer Biegezugbelastung auf das Wachs ausgegangen. Aus diesem Grund wurde die Biegezugfestigkeit nicht als maßgebende Größe in das Anforderungsprofil für Wachse als Schalungsmaterial (vergl. 0) aufgenommen. Die Biegezugfestigkeit stellt aber dennoch eine relevante und daher zu ermittelnde Größe dar, da mit ihr die verschiedenen Wachse untereinander verglichen werden können. Im Rahmen der Bachelorarbeit von Frau Elena Stein wurde am ITE mit maßgeblicher Unterstützung des Autors dieser Arbeit eine Vielzahl von Biegezugversuchen an den ausgewählten 9 Wachsen durchgeführt. In Analogie zur DIN EN 1961 [139] wurden die Biegezugversuche an einer manuell betriebenen Biegezug Prüfmaschine (Abbildung 3-15, rechts) am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig am Fachgebiet Baustoffe durchgeführt. Die im Versuchsprotokoll „Biegezugversuche Wachse“ (Anhang F) dargestellten Untersuchungen wurden in drei aufeinanderfolgenden Schritten durchgeführt und können wie folgt zusammengefasst werden:

Im ersten Schritt wurden 36 gegossene Wachsprobekörper (Wachsprismen mit Abmessungen 160 mm x 40 mm x 40 mm) bei einer Raumtemperatur von etwa 20°C auf ihre Biegezugfestigkeit geprüft.

Da einige Wachse trotz optimierter Gussmethode noch Mängel in der Form der hergestellten Wachsprobekörper, wie eine eingefallene Oberfläche oder nicht parallele Seitenwände, aufwiesen (Abbildung 3-15, links, mittlerer Probekörper), wurden für den zweiten Versuchsschritt die Probekörper dieser Wachse nach dem Gießen zusätzlich in Form gepresst bzw. umgeformt. Um die Wachsprobekörper noch im plastischen Zustand vor der abgeschlossenen Kristallisation umzuformen, wurden die Probekörper hierfür auf eine Verformungstemperatur von 50°C erwärmt, die etwas über dem Onset-Wert aus der DSC-Analyse liegt (Annahme, dass diese etwa der Glasübergangstemperatur entspricht). Besonders beim Wachs CFW konnten mit dieser Methode des Umformens durch Pressen sehr maßhaltige Probekörper hergestellt werden (Abbildung 3-15, links, rechter Probekörper). Im zweiten Schritt wurden die so durch Umformen hergestellten 11 Wachsprobekörper bei einer Raumtemperatur von etwa 20°C auf ihre Biegezugfestigkeit geprüft.

Im dritten Schritt, der als Tastversuch zu werten ist, wurde eine kleine Auswahl von 6 Wachsprobekörpern über zwei Stunden in einem 50°C warmen Ofen mit Temperaturregler erwärmt und anschließend bei dieser Temperatur auf die Biegezugfestigkeit geprüft.



Abbildung 3-15: Mit verschiedenen Methoden hergestellte Wachsprobekörper am Beispiel von CFW (von l. nach r.): in kalte Form gegossener Probekörper / in erhitzte Form gegossener Probekörper / Herstellung wie zweiter Probekörper mit anschließendem Pressen bei 50°C (Onset-Wert) (links), verwendete Biegezug Prüfmaschine des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig am Fachgebiet Baustoffe (rechts)

In den ersten beiden Versuchsschritten bei etwa 20°C zeigten alle geprüften Wachse im Biegezugversuch ein nahezu lineares (wahrscheinlich elastisches) Verhalten und versagten in einem Sprödbbruch bei Erreichen der Bruchlast. Basierend auf der gemittelten maximalen absoluten Durchbiegung  $s_{max}$ , welche durch lineare Extrapolation der Zwischenergebnisse mit Bezug zur gemittelten Bruchlast errechnet wurde, wurde nach Gleichung (3) die maximale gemittelte Biegedehnung der jeweiligen Wachse berechnet.

$$\Delta\varepsilon_{f,max} = \frac{6 * s_{max} * H}{L^2} \quad (3)$$

Auf Basis der gemittelten Bruchlast wurde entsprechend DIN EN 196-1:2005 [139] nach Gleichung (4) die gemittelte maximale Biegespannung der Randfaser (Biegezugfestigkeit) der jeweiligen Wachse berechnet.

$$\Delta\sigma_{f,max} = \frac{3 * F_B * L}{2 * B * H^2} \quad (4)$$

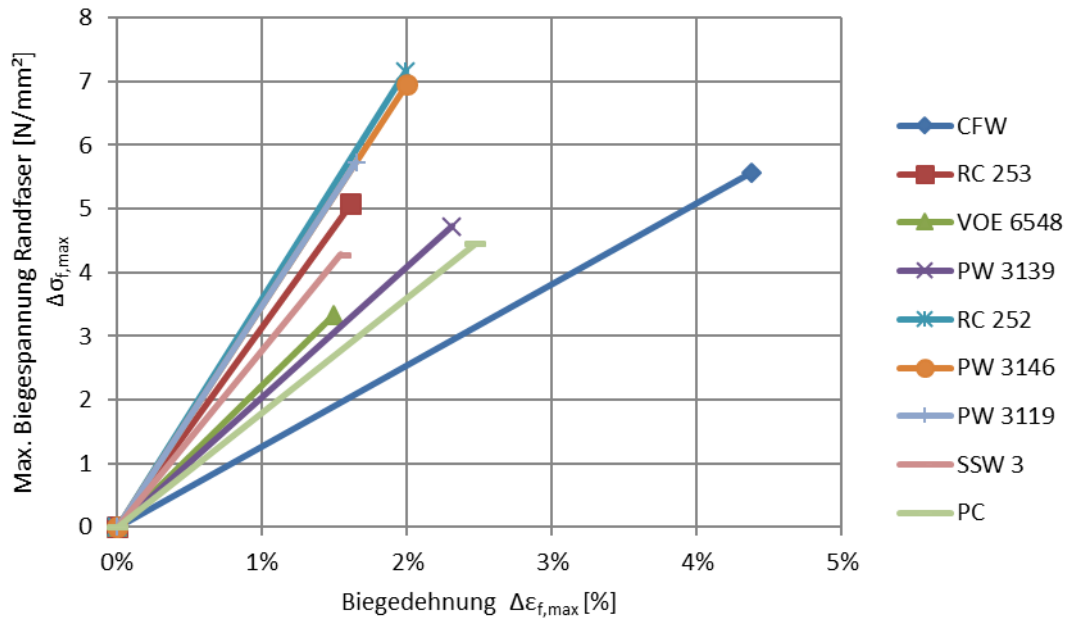


Abbildung 3-16: Biege-Spannungs-Dehnungs-Diagramm der untersuchten Wachse (aus Mittelwerten der gegossenen Probekörper)

Obwohl die in Abbildung 3-16 dargestellten maximalen gemittelten Biegespannungen der Randfaser (Biegezugfestigkeit) und die maximalen gemittelten Biegedehnungen der jeweiligen Wachse aufgrund der nicht kalibrierten und manuell betriebenen Prüfmaschine einer teilweise relativ hohen Standardabweichung  $s$  [%] unterliegen (Tabelle 12), sind dennoch signifikante Unterschiede zwischen den Wachsen hinsichtlich ihres Biegetragverhaltens zu erkennen und ein quantitativer Vergleich ist möglich.

Tabelle 12: Versuchsergebnisse der gegossenen Wachsprobekörper (Mittelwerte)

(Standardabweichung  $s$  zum jeweiligen Bezugswert)

Wachs		N [-]	Bruchlast $F_B$ [N]	Absolute Durch- biegung $s_{max}$ bei $F_B$ [mm]	Biege- dehnung $\Delta\epsilon_{f,max}$ [%]	$s$ [%]	Max. Biegespannung Randfaser (Biegezugfestigkeit) $\Delta\sigma_{f,max}$ [N/mm²]	$s$ [N/mm²]	Biegemodul $E_f = \sigma/\epsilon$ $\Delta E_f$ gemittelt [N/mm²]	$s$ [N/mm²]
CFW	G	2	1790,33	2,30	4,38	1,44	5,57	0,51	145,49	41,14
RC 253*	G	5	1781,50	0,82	1,61	0,20	5,08	0,83	301,10	46,45
VOE 6548	G	3	1046,40	0,78	1,49	0,10	3,32	0,33	209,41	5,58
PW 3139	G	5	1618,65	1,21	2,31	0,37	4,72	0,70	192,35	23,11
RC 252*	G	3	2517,90	1,00	1,99	0,61	7,16	1,12	361,73	119,46
PW 3146*	G	4	2256,30	1,01	2,00	0,33	6,96	1,44	325,31	74,18
PW 3119	G	3	1635,00	0,88	1,65	0,34	5,73	1,04	334,95	16,13
SSW 3	G	5	1098,72	0,81	1,54	0,32	4,28	1,02	274,12	65,86
PC	G	3	1332,53	1,30	2,47	0,33	4,45	0,46	166,99	45,13
CFW Holz*	G	1	1716,75	1,70	3,41	-	5,51	-	164,62	-

\*Wachse mit Füllstoffen

CFW Holz ist gefüllt mit 15 % Holzspänen Eiche  $\leq 1$  mm (zusätzlicher Tastversuch)

Das Wachs CFW zeigt eine gute Biegezugfestigkeit, dabei aber den geringsten Biegemodul und somit die größte maximale Biegedehnung aller untersuchten Wachse. Die Wachse RC252 und PW3146 zeigen die höchste Biegezugfestigkeit und den höchsten Biegemodul, die Biegedehnung ist dabei allerdings geringer. Diese beiden Wachse verhalten sich im Vergleich also deutlich spröder, was sich u. a. auf den enthaltenen Füllstoff zurückführen lässt. Hinsichtlich des (Biege-)E-Moduls erreichen die untersuchten Wachse ähnliche Werte wie weiche Thermoplaste, z. B. weiche Polyethylene (PE).

Die im zweiten Schritt geprüften und durch Pressen umgeformten Wachsprobekörper der Wachse CFW, VOE6548, PW3139 und SSW3 erreichen im Vergleich zu den gegossenen Wachsprobekörpern jeweils deutlich geringere maximale Bruchlasten, maximale Biegespannungen an der Randfaser und Biegemodule. Obwohl die gepressten Wachsprobekörper eine deutlich bessere Form bzw. Maßhaltigkeit aufweisen (vergl. Abbildung 3-15), zeigt der Vergleich der Versuchsergebnisse (Anhang F), dass anscheinend durch das Pressen die Kristallstruktur der Wachse geschädigt wird, was zu einem allgemeinen Festigkeitsverlust führt. Bezogen auf die erreichbare gemittelte Biege-Bruchlast verringert sich diese z. B. beim Wachs CFW um 40 %.

Die im dritten Schritt geprüften Wachsprobekörper mit einer Kerntemperatur von 50°C konnten nicht vollständig in Analogie zu den ersten beiden Schritten geprüft werden, da nur sehr geringe maximale Belastungen ablesbar waren. An den Versuchsergebnissen ist zu erkennen, dass bei Temperaturen über dem Onset-Wert aus der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) das Wachs sehr schnell seine Tragfähigkeit verliert und sich unter Belastung plastisch verformt. Hieraus ist abzuleiten, dass die Onset-Temperatur in etwa der Glasübergangstemperatur entspricht und somit bei Wachsen, die als Schalungsmaterial für Beton eingesetzt werden sollen, den maximalen thermischen Gebrauchsbereich begrenzen.

#### 3.3.3.5 Zylinderdruckfestigkeit

Zur Herstellung der zylindrischen Wachs-Versuchskörper wurden die Wachse in einem Ofen geschmolzen und in eine erwärmte und isolierte Metallzylinderform (Innendurchmesser 70 mm) gegossen. Während des langsamen Abkühlens über 12 h wurde, sofern möglich, heißes flüssiges Wachs in den Kern nachgegossen, um den thermischen Schwund auszugleichen. Anschließend wurden die Probekörper mit einem Kolben aus der Form herausgepresst und an den Stirnseiten plangefräst (Probekörperlänge etwa 140 mm). Für die Wachse CFW, RC252, RC253, PW3146, SSW3 und VOE6548 konnten auf diese Weise Probekörper hergestellt werden. Die mit den Wachsen PW3139, PW3119 und PC auf diese Weise hergestellten Probekörper wiesen hingegen nach dem Ausschalen starke Lufteinschlüsse und Risse auf (Abbildung 3-17, rechts), sodass diese nicht geprüft werden konnten.



Abbildung 3-17: Erste Druckfestigkeitsprüfung der Wachse mittels Werkstattpresse, Kraftmessdose und analogen Wegmessuhren am ITE (links), fehlerhafter Probekörper aus PW 3139 nach dem Ausschalen (rechts)

Die ersten Druckversuche für die Wachse CFW, PW 3146 und RC 252 wurden am ITE mit einer manuell betriebenen Hydraulikpresse Typ PROFITEXX Werkstattpresse WP20T mit einer maximalen Presskraft von 200 kN durchgeführt. Der Versuchsaufbau einschließlich der verwendeten Kraftmessdose und der beiden analogen Wegmessuhren ist in Abbildung 3-17, links dargestellt. Vor der Prüfung wurden alle Probekörper vermessen, und anhand der durchgeführten Filmaufnahmen wurden die Messergebnisse zur Auswertung in ein Excel-Dokument übertragen.

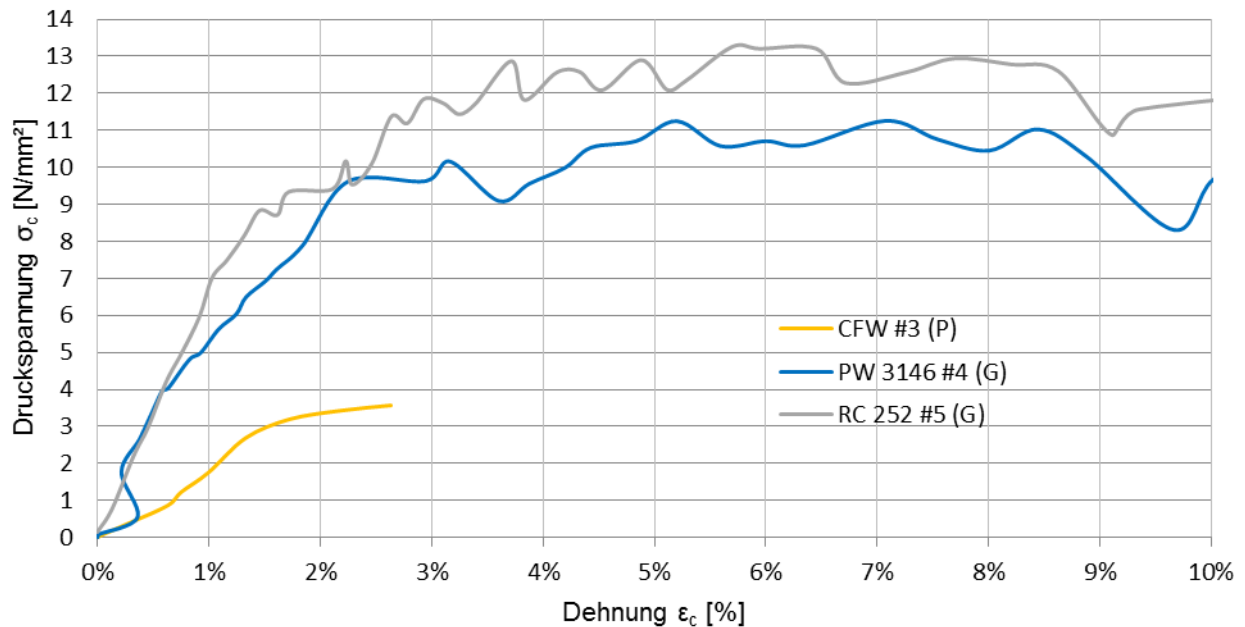


Abbildung 3-18: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm der Wachse CFW, PW 3146 und RC 252 aus erster Druckfestigkeitsprüfung am ITE

Die starken Schwankungen der auf dieser Weise bei 20°C ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der Wachse, wie in Abbildung 3-18 dargestellt, lassen sich auf die manuell betriebene Prüfmaschine und die daraus resultierende stark schwankende und nicht normierte Prüfgeschwindigkeit zurückführen. Nach [124] führt eine Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit (analog zu einer Erniedrigung der Temperatur) zu höheren gemessenen Steifigkeiten. Da die Prüfgeschwindigkeit stark schwankte und zudem nicht bestimmt werden konnte, wurden die Messergebnisse als nicht verwertbar eingestuft und die Versuche wurden abgebrochen.

Um eine hinreichende Vergleichbarkeit der Wachse untereinander sicherzustellen, wurden die nachfolgenden Druckversuche an einer kalibrierten elektromechanischen Zug- / Druck-Prüfmaschine der Firma Zwick am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig am Fachgebiet Baustoffe weggeregelt durchgeführt. Gemäß Empfehlungen der DIN ISO 604 (Bestimmung der Druckeigenschaften von Kunststoffen) [140] wurden die prüffähigen zylindrischen Wachsprobekörper bei 20°C mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min (für Modulmessungen) zentrisch belastet. Aufgrund der Komplikationen bei der Herstellung der Probekörper und der Kapazitätsbeschränkungen der Prüfmaschine wurde abweichend von der DIN ISO 604 je Wachs nur ein Probekörper getestet. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 3-19 und Tabelle 13 dargestellt.

Wie am Verlauf der Graphen im  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm (Abbildung 3-19) zu sehen ist, zeigen die Graphen aller Wachse einen nahezu linearen Anstieg bis zum Erreichen ihrer jeweils unterschiedlich stark ausgeprägten Druckfließspannung  $\sigma_y$ , bei welcher erstmalig ein Anstieg der Stauchung bzw. Dehnung ohne einen weiteren Anstieg der aufnehmbaren Spannung erfolgt.



Nach Erreichen der Druckfließspannung zeigen die Wachse

- CFW und PW 3146 eine plastische Verformung ohne Bruch bei konstant bleibender aufnehmbarer Spannung bis zum Versuchsende bei 25 % Stauchung.
- RC 252 und RC 253 eine plastische Verformung mit einem leichten Abfallen der aufnehmbaren Spannung, wahrscheinlich verursacht durch die registrierten leichten Risse und Abplatzungen bis zum Versuchsende bei 25 % Stauchung.
- VOE 6548-v2 und SSW 3 einen Abfall der aufnehmbaren Spannung bis zum Versagen des Probekörpers durch Bruch bei etwa 2 % bzw. 3 % Stauchung.

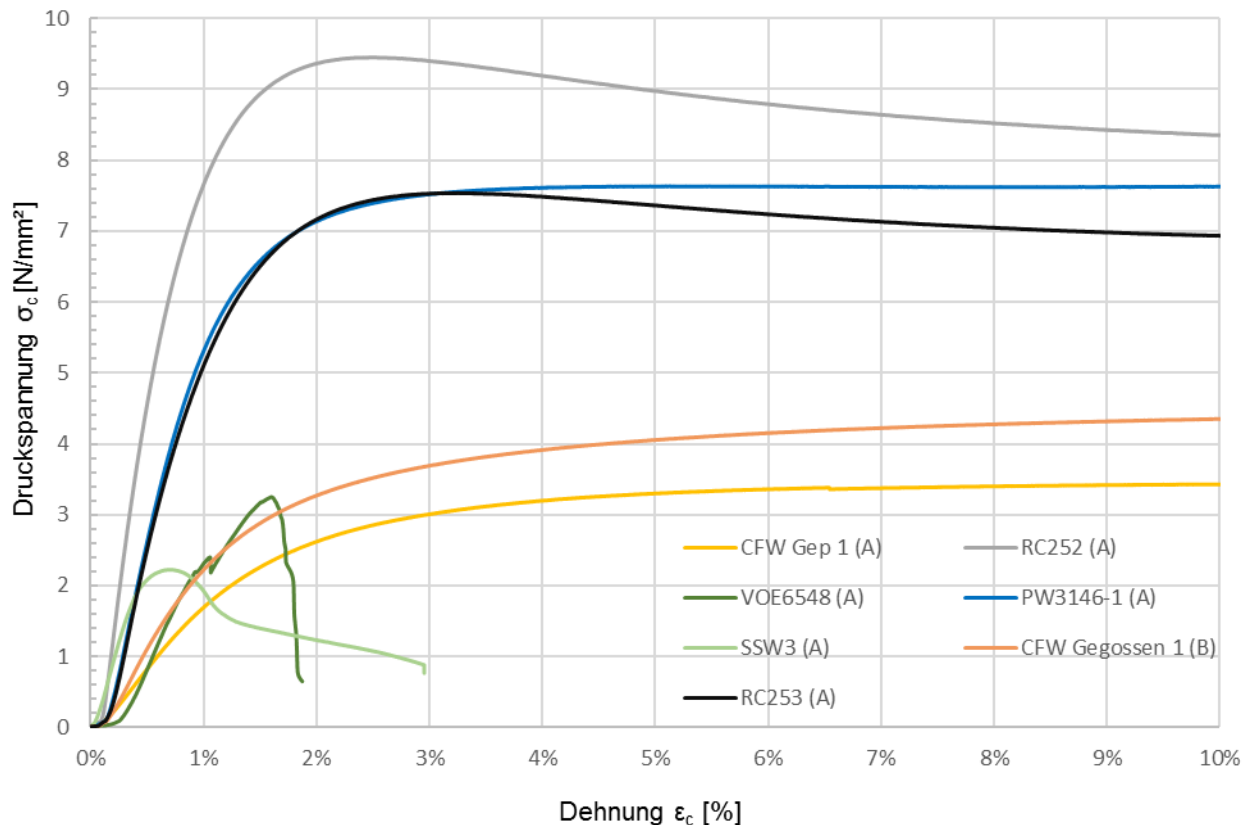


Abbildung 3-19: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm der Wachse CFW, PW 3146, RC 252, RC 253, SSW3 und VOE 6548-v2 bei 20°C und einer Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min (A) und 5 mm/min (B)

Tabelle 13: Relevante Druckeigenschaften der Wachse im einachsigen Zylinderdruckversuch

Wachs	N	Druckfließspannung $\sigma_y$ [MPa]	Nominelle Fließstauchung $\epsilon_{cy}$ [%]	Druckspannung $\sigma_x$ [MPa] (aus Diagramm, abgelesen bei deutlicher Verringerung der Tangentensteigung)	Nominelle Fließstauchung $\epsilon_{cx}$ [%]	Stauchung bei $\sigma = 0,25$ MPa $\epsilon_{0,25}$ [%]	E-modul [MPa]
CFW (A)	2	3,3	5,0*	2,5	1,80	0,22	1923
PW 3146 (A)	1	7,6	3,7	6,5	1,45	0,17	6295
RC 252 (A)	1	9,45	2,37	8,0	1,09	0,12	9516
RC 253 (A)	1	7,54	2,94	6,5	1,50	0,18	5109
VOE 6548-v2 (A)	1	3,25	1,6	2,2	0,93	0,33	2671
SSW 3 (A)	1	2,2	0,7	1,7	0,36	0,08	4642
CFW (B)	1	4,02	5,0*	2,7	1,44	0,16	2141

\* CFW zeigt keine exakte Druckfließspannung, weswegen die nominelle Fließstauchung  $\epsilon_{cy}$  auf 5 % begrenzt wurde.

Um eine hinreichende Vergleichbarkeit der Wachse untereinander und mit dem gestellten Anforderungsprofil für Wachse als Schalungsmaterial zu ermöglichen, wurden die in Tabelle 13 dargestellten Werte aus den Messergebnissen ermittelt. Wird die Druckspannung  $\sigma_x$  (bei deutlicher Verringerung der Tangentensteigung) als maximale Druckfestigkeit der Wachse verstanden, erfüllen alle Wachse die gestellten Anforderungen an eine Druckfestigkeit von min. 0,25 N/mm<sup>2</sup> (vergl. 0). Bei Beaufschlagung der geforderten Druckfestigkeit um den Sicherheitsfaktor 10 (2,5 N/mm<sup>2</sup>) und der Annahme, dass die Druckfestigkeit der Wachse bei der gegenüber der Druckfließspannung abgeminderten Druckspannung  $\sigma_x$  liegt, erfüllen die Wachse SSW 2 und VOE 6548-v2 die gestellten Anforderungen nicht mehr. Der jeweils zwischen den Stauchungswerten 0,15 % und 0,6 % ermittelte Druck E-Module aller Wachse erfüllt ebenfalls die gestellten Anforderungen von > 25 N/mm<sup>2</sup> bzw. Faktor 10 (> 250 N/mm<sup>2</sup>). Zur Veranschaulichung der Versuchsergebnisse sind die Wachsprobekörper am Ende der jeweiligen Druckversuche in Abbildung 3-20 dargestellt.

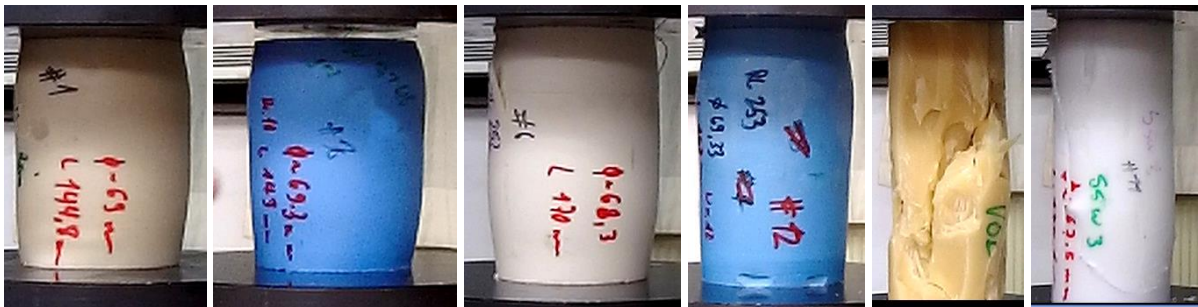


Abbildung 3-20: Wachsprobekörper am Ende der jeweiligen Druckversuche (v.l.n.r.): CFW und PW 3146 zeigen eine plastische Verformung ohne Bruch bei 25 % Stauchung, RC 252 und RC 253 zeigen eine plastische Verformung mit leichten Rissen und Abplatzungen bei 25 % Stauchung, VOE 6548-v2 und SSW 3 versagen durch Bruch bei etwa. 2 % bzw. 3 % Stauchung.

Von den in dieser Versuchsreihe untersuchten prüffähigen Wachsen scheint das Wachs CFW als einziges Wachs ohne Füllstoffzusatz die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Obwohl CFW wie bei den Biegezugversuchen den geringsten E-Modul aller untersuchten Wachse aufzeigt, scheinen seine Druckeigenschaften, wie am folgenden Beispiel deutlich wird, hinreichend für die Anwendung als Schalungsmaterial zu sein. Wird die Stauchung  $\epsilon_{0,25}$  bei der angenommenen Maximalbelastung durch den hydrostatischen Frischbetondruck von  $\sigma_{hd,max} = 0,25$  MPa angesetzt und mit den Annahmen aus Kapitel 3.2 verglichen, bedeutet dies, dass eine Schalung aus CFW am Fußpunkt einer 10 m hohen Schalung, die mit Frischbeton gefüllt wird, eine Maximaldicke von 22 cm haben dürfte, ohne dass die maßgebende Präzision planmäßig den Zielwert der zulässigen Verformung von  $\pm 1,0$  mm überschreitet.

Um den in [124] beschriebenen Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Versuchsergebnisse zu verifizieren, wurde zusätzlich zu den Probekörpern mit dem Zusatz A (Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min) noch ein Probekörper mit dem Zusatz B (Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min) geprüft. Beim Vergleich der Graphen CFW (A) und (B) in Abbildung 3-19 wird der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Versuchsergebnisse deutlich. Der mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min geprüfte Probekörper zeigt eine um 11 % höhere Steifigkeit / E-Modul und eine 21 % höhere aufnehmbare Spannung bei der gewählten nominellen Fließstauchung  $\epsilon_{cy}$  von 5 %. Da dieser Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Prüfergebnisse schwer abzuschätzen ist und ebenfalls von der Prüftemperatur abhängt, sollte bei der Verwendung der Ergebnisse ein entsprechend hoher Sicherheitsfaktor berücksichtigt werden.

#### 3.3.4 Weiterführende Untersuchungen an selektierten Wachsen

Aus Kapazitätsgründen konnten die im Folgenden dargestellten weiterführenden Untersuchungen zur Ermittlung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften (Prismendruckfestigkeit, Zeitstandverhalten, Zugfestigkeit und der Schubmodul) nicht für alle 9 vorausgewählten Wachse (vergl. 3.3.2) durchgeführt werden. Basierend auf einem vorgezogenen Vergleich der in Kapitel 3.3.3 ermittelten maßgebenden physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Wachse mit dem für die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie gestellten Anforderungsprofil wurde daher festgelegt, die weiterführenden Untersuchungen lediglich für die Wachse PW 3146 und CFW durchzuführen. Ergänzend wurde dabei der Fokus dieser Untersuchungen auf den Einfluss der Temperatur und den signifikanten Einfluss von Füllstoffen gelegt. Zur Begründung der Auswahl von PW 3146 und CFW siehe Kapitel 3.4.

##### 3.3.4.1 Prismendruckfestigkeit, Einfluss von Temperatur und Füllstoffen

Diese zusätzlichen Versuche an den Wachsen CFW und PW 3146 zur (Kurzzeit-) Prismendruckfestigkeit dienen u. a. der Verifizierung folgender Punkte:

- Bestätigung der gemessenen Zylinderdruckfestigkeiten (vergl. 3.3.3.5) bei 20°C und Einschätzung der Streubreite der Ergebnisse
- Ermittlung des Einflusses der Temperatur (10, 20, 30 und 40°C) auf die Druckfestigkeit
- Ermittlung des Einflusses von Füllstoffen im Wachs auf die Druckfestigkeit

Da sich die Herstellung der zylinderförmigen Probekörper als problematisch herausgestellt hat, wurden 24 rechteckige prismatische Wachsprobekörper, wie in der DIN ISO 604 [140] empfohlen, aus gegossenen Blöcken mittels einer CNC Fräse herausgeschnitten. Folgende Probekörper mit den Abmessungen: Länge 178 mm und Querschnittsfläche etwa 3000 mm<sup>2</sup> (55 x 55 mm) wurden hergestellt (Abbildung 3-21):

- 6 Stück CFW, angereichert mit 40 Gew- % Füllstoff (Terephthalsäure)
- 3 Stück CFW, angereichert mit 20 Gew- % Füllstoff (Rohcellulose Arbocel C100)
- 6 Stück reines CFW ohne Füllstoff
- 3 Stück reines PW 3146 ohne Füllstoff
- 6 Stück PW 3146, angereichert mit 40 Gew- % Füllstoff (Terephthalsäure)

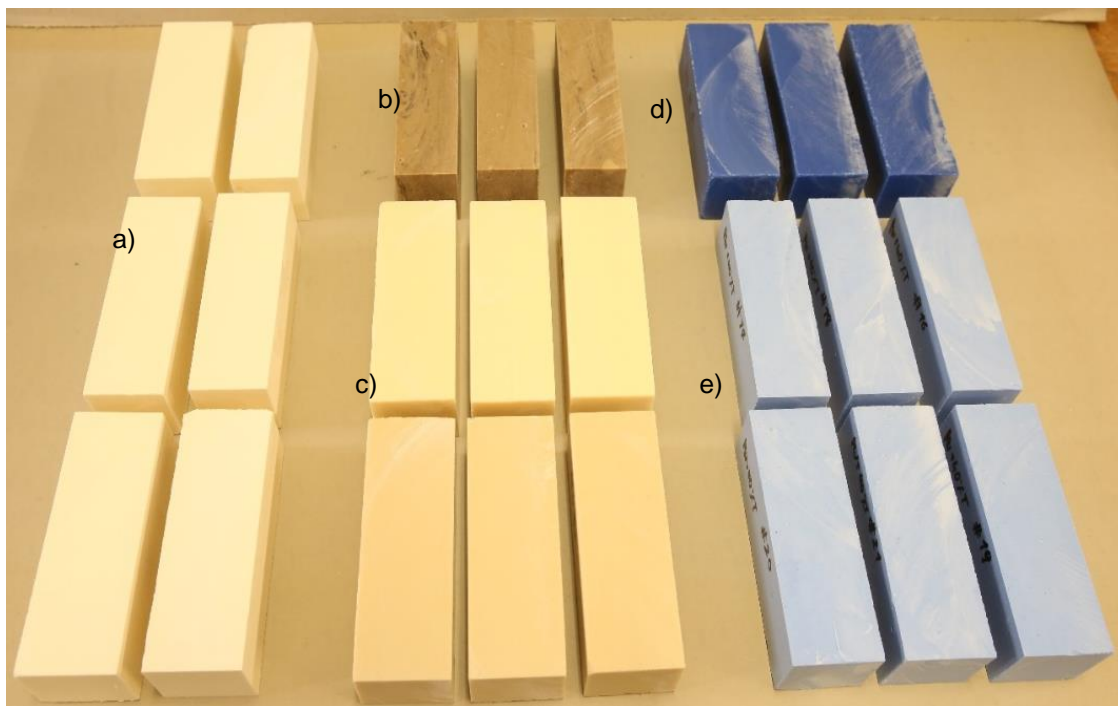


Abbildung 3-21: Hergestellte Probekörper: a) 6 Stück CFW, angereichert mit 40 Gew- % Füllstoff (Terephthalsäure) (links), b) 3 Stück CFW, angereichert mit 20 Gew- % Füllstoff (Rohcellulose Arbocel C100) (Mitte oben), c) 6 Stück reines CFW ohne Füllstoff (Mitte unten), d) 3 Stück reines PW 3146 ohne Füllstoff (rechts oben), e) 6 Stück PW 3146, angereichert mit 40 Gew- % Füllstoff (Terephthalsäure) (rechts unten)

Die Druckfestigkeitsprüfung wurde an einer kalibrierten elektromechanischen Zug-/Druck-Prüfmaschine der Firma Zwick am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig am Fachgebiet Baustoffe bei unterschiedlichen Probekörpertemperaturen weggeregelt mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min (Zusatz B) und zentrischer Belastung durchgeführt.

Die Ergebnisse der Versuche für die Wachse CFW und PW 3146 (werkseitig mit Füllstoff angereichert) sind in den Druckspannungs-Dehnungs-Diagrammen in Abbildung 3-22 und Abbildung 3-23 dargestellt.

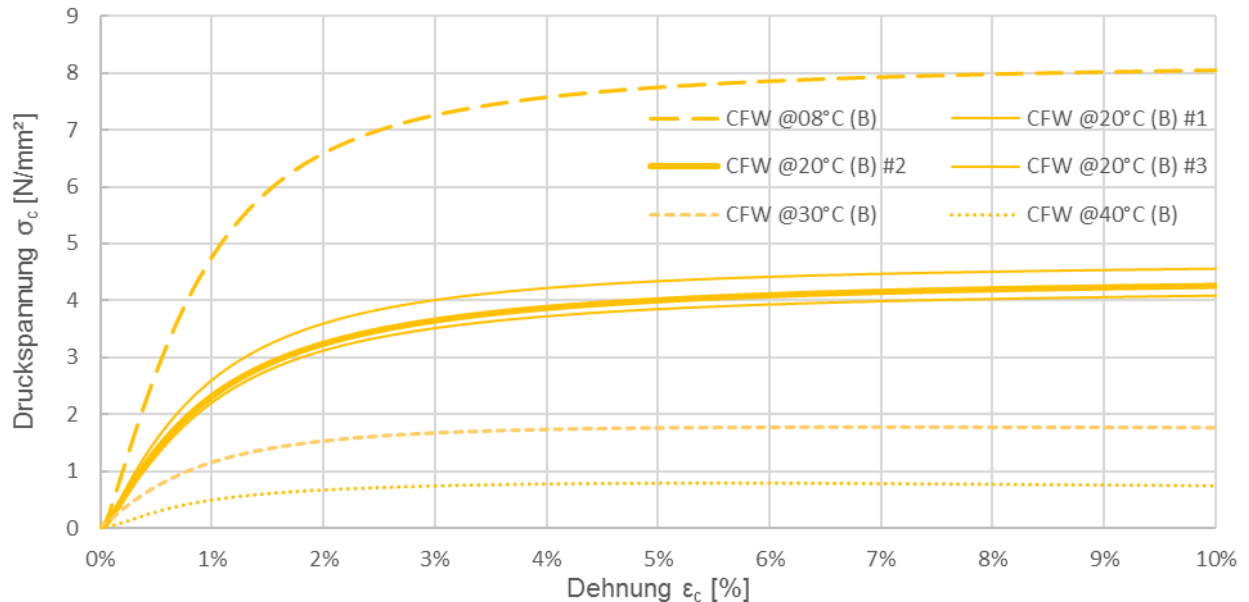


Abbildung 3-22: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm der reinen CFW Wachspben bei 8, 20, 30 und 40°C, Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min (B)

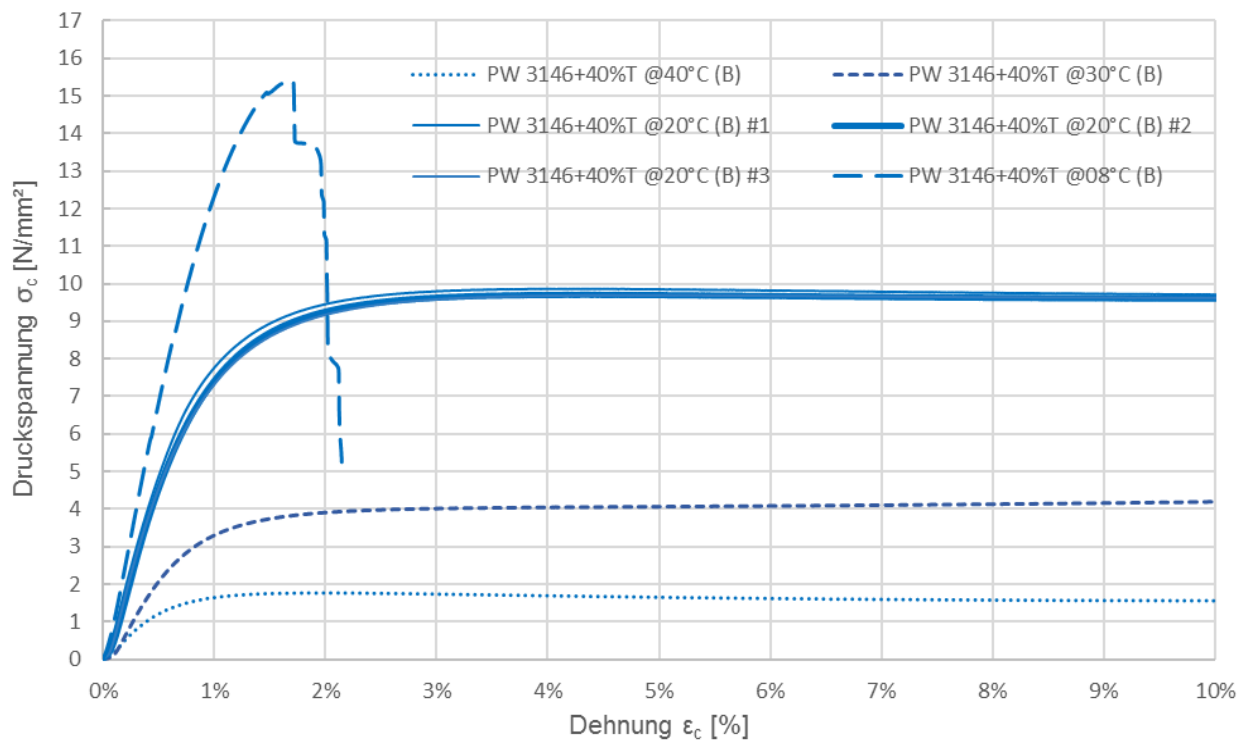


Abbildung 3-23: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm der PW 3146 Wachspben (werkseitig angereichert mit 40 % Füllstoff Terephthalsäure) bei 8, 20, 30 und 40°C, Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min (B)

Aus den Verläufen der Graphen im  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm der Wachse CFW (Abbildung 3-22) und PW 3164 (Abbildung 3-23) können dabei folgende Schlüsse gezogen werden:

- Im Vergleich zu den bei gleicher Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min gemessenen Kurzzeit-Zylinderdruckfestigkeiten (vergl. Abbildung 3-19 – CFW gegossen 1 (B)) zeigen die Prismendruckfestigkeiten von CFW bei 20°C sehr ähnliche Verläufe.
- Im Vergleich zu den bei einer Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min gemessenen Kurzzeit-Zylinderdruckfestigkeiten (vergl. Abbildung 3-19 – PW3146-1 (A)) zeigen die Prismendruckfestigkeiten von PW3146 bei gleicher Dehnung geringfügig höhere Druckspannungen, was sich auf die höhere Prüfgeschwindigkeit zurückführen lässt.
- Wie an den Verläufen der Graphen der jeweils dreifach geprüften Wachsprobekörper bei 20°C zu sehen ist, liegen die Ergebnisse nah beieinander und zeigen bei PW 3134 eine kaum zu differenzierende und bei CFW sehr geringe Streubreiten (bzw. geringe Abweichungen untereinander). Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Wachsprobekörper bei gleichen Prüfbedingungen jeweils reproduzierbare Ergebnisse liefern und dass die bei 8, 30 und 40°C nur einfach geprüften Probekörper repräsentative Ergebnisse liefern.
- Bezüglich des Einflusses der Temperatur ist bei beiden Wachsen gleichermaßen festzustellen, dass die Druckfließspannung  $\sigma_y$ , bei welcher erstmalig ein Anstieg der Stauchung bzw. Dehnung ohne einen weiteren Anstieg der aufnehmbaren Spannung erfolgt, wie auch der Druck E-Modul mit steigender Temperatur abnimmt bzw. mit sinkender Temperatur zunimmt (Tabelle 14).
- Als grober Richtwert bedeutet dies für das Wachs CFW, dass sich die Druckfließspannung  $\sigma_y$ , ausgehend von etwa 10°C je Temperaturzunahme, um 10°K etwa halbiert.

Tabelle 14: E-Module der Wachse in Abhängigkeit zur Temperatur der Probekörper in [MPa] (E-Modul jeweils zwischen  $\epsilon_1 = 0,5\%$  und  $\epsilon_2 = 0,9\%$  Dehnung ermittelt und gerundet)

Wachs	E-Modul [MPa] bei Prüftemperatur			
	8°C	20°C	30°C	40°C
<b>CFW</b>	4.500	2.100	1.000	500
<b>CFW + T40 %</b>	8.500	4.500	2.000	700
<b>CFW + C20 %</b>	k. A.	4.300	2.200	k. A.
<b>PW 3146</b>	k. A.	4.000	1.700	k. A.
<b>PW 3146 +T40 %</b>	11.500	7.100	3.500	1.600

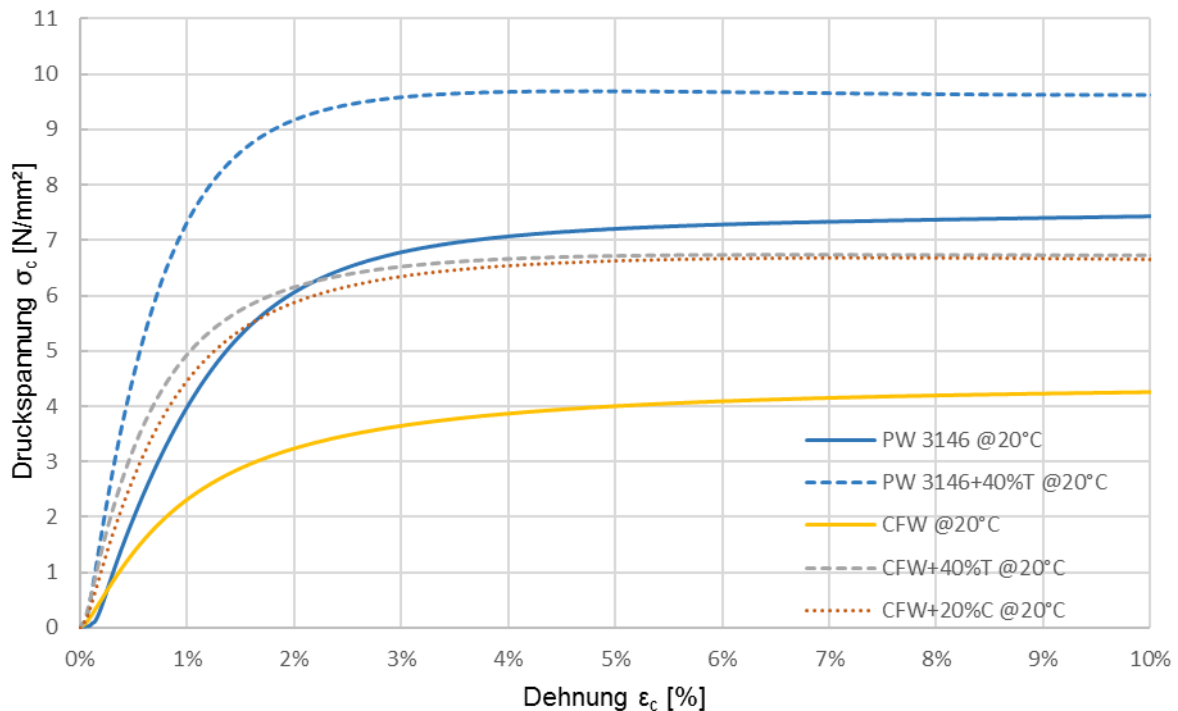


Abbildung 3-24: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm bei 20°C der Wachsproben PW 3146 und CFW jeweils mit und ohne Füllstoff (Terephthalsäure) und CFW mit Füllstoff (Rohcellulose), Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min (B)

Durch Vergleich der Graphen im  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm der Wachse CFW und PW 3146, jeweils bei 20°C mit und ohne Füllstoffe (Abbildung 3-24), wird der signifikante Einfluss der Füllstoffe auf die Druckfestigkeit und den E-Modul deutlich. Durch einen beispielhaften Vergleich der aufnehmbaren Druckspannung bei 5 % Stauchung kann dieser Effekt wie folgt anschaulich quantifiziert werden:

Bei reinem CFW liegt die aufnehmbare Druckspannung bei etwa 4 N/mm², wohingegen CFW mit einem Füllstoff-Massenanteil von 40 M% Terephthalsäure bzw. 20 M% Rohcellulose C100 eine aufnehmbare Druckspannung von etwa 6,8 N/mm² aufzeigt, was einer Erhöhung der aufnehmbaren Druckspannung von etwa 70 % entspricht. Ein ähnlicher Effekt, wenn auch schwächer, kann beim Wachs PW 3146 beobachtet werden. Die aufnehmbare Druckspannung bei PW 3146 von etwa 9,8 N/mm², mit einem Füllstoff-Massenanteil von 40 M% Terephthalsäure, liegt gegenüber reinem PW 3146 von etwa 7,3 N/mm² etwa 35 % höher.

Obwohl es sich hierbei nur um einen Tastversuch handelt und Art bzw. Masseanteil der bei CFW eingesetzten Füllstoffe stark unterschiedlich sind, zeigt die signifikante Steigerung der aufnehmbaren Druckspannung das positive Potential von Füllstoffen im Wachs. Um das volle Potential der Beimischung von Füllstoffen im Wachs für die Anwendung in der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie ausnutzen zu können, wird empfohlen, weiterführende detaillierte Untersuchungen mit unterschiedlichen Füllstofftypen (Kunststoffe, Zellulose, Mineralien etc.) bei unterschiedlichen Konzentrationen und Temperaturen durchzuführen.



### 3.3.4.2 Zeitstandverhalten / Kriechen und Einfluss von Füllstoffen

Wachse können aufgrund ihrer Viskoelastizität ein zum Teil starkes zeit- und temperaturabhängiges plasto-elastisches Verhalten zeigen (vergl. 3.1.3.2). Da sich der Frischbetondruck als maßgebende Belastung auf eine Wachsschalung erst langsam durch die Zementhydratation abbaut (vergl. 4.1.2.2), ist nicht nur die spontane elastische Dehnung  $\varepsilon_{el,0}$ , sondern auch die nachwirkende zeitabhängige Dehnung  $\varepsilon_k$  (Kriechen) in der Gesamtverformung bis zum Erhärten des Bauteils (Grünstandfestigkeit) zur Einhaltung der geforderten Präzision (Maßabweichungen) zu berücksichtigen. Da  $\varepsilon_k$  nicht für alle Wachse bei allen denkbaren Belastungen (und ggf. möglichem Temperatur-Einfluss der Hydratationswärme) untersucht werden konnte, wurden in Analogie zu den Versuchen zur Zylinderdruckfestigkeit (vergl. 3.3.3.5) zylinderförmige Probekörper der Wachse PW 3146 (werkseitig gefüllt mit 40 M% Füllstoff Terephthalsäure), reines CFW sowie CFW T40% (40 M% Füllstoff Terephthalsäure) und CFW C20% (20 M% Füllstoff Rohcellulose Arbocel C100) hergestellt und mit einer konstanten Spannung von 1 N/mm<sup>2</sup> auf Druck über 10 Stunden bei 20°C an einer kalibrierten elektromechanischen Zug- / Druck-Prüfmaschine der Firma Zwick am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig am Fachgebiet Baustoffe belastet. Die in diesen Tastversuchen gemessenen, zeitabhängigen Verformungskurven sind in Abbildung 3-25 dargestellt.

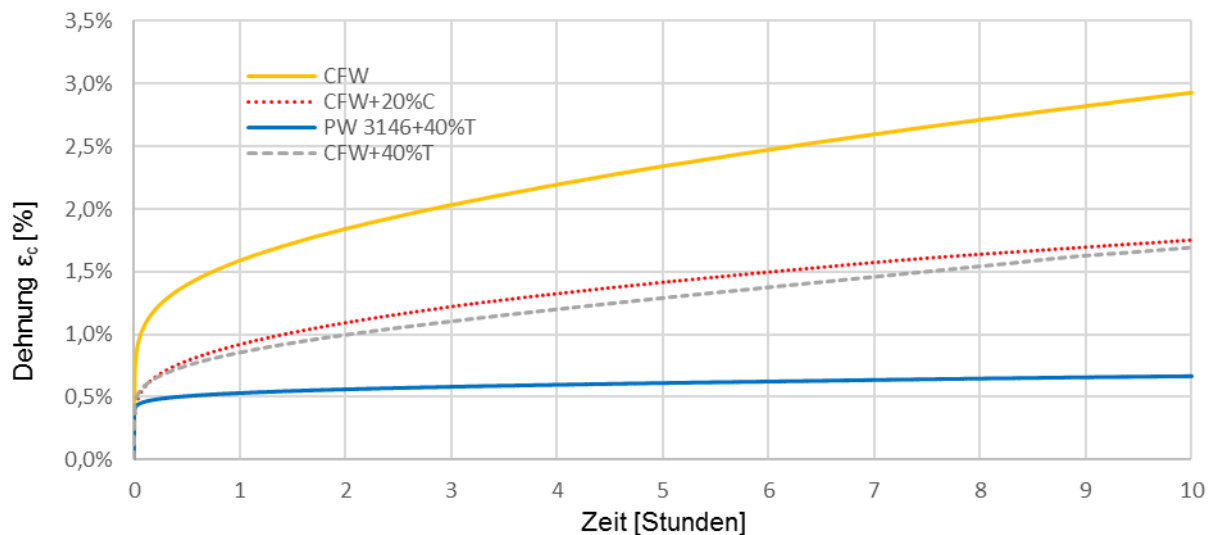


Abbildung 3-25: Zeit-Dehnungs-Diagramm zum plasto-elastischen Verhalten (Kriechen) der Wachse PW 3146 (werkseitig gefüllt mit 40 % Füllstoff Terephthalsäure), CFW sowie CFW 40% T und CFW 20% C, gemessen bei 20°C

Um die gemessenen Ergebnisse besser bewerten zu können, sind die als relevant befundenen Messergebnisse in Tabelle 15 quantitativ je Wachs vergleichend dargestellt. Die gemessene Gesamtverformung wurde in einen spontanen elastischen und nachwirkenden zeitabhängigen Dehnungsanteil aufgeteilt. Der spontane elastische Anteil ist dabei die Dehnung, die sich bis zum Erreichen der konstant gehaltenen Spannung von 1 N/mm<sup>2</sup> (Prüfgeschwindigkeiten etwa 1 mm/min) einstellt. Zur Bewertung des viskoelastischen Verhaltens der Wachse über die Zeit wird neben den absoluten Werten der Verformungen das zwischen  $\varepsilon_{k,10h}$  zu  $\varepsilon_{el,0}$  ermittelte Verhältnis herangezogen. Dieses Verhältnis soll es ermöglichen, aus der in den Druckfestigkeitsuntersuchungen (vergl. 3.3.3.5 und 3.3.4.1) bei unterschiedlichen Spannungen ermittelten spontanen elastischen Dehnung  $\varepsilon_{el,0}$  die materialabhängige nachwirkende zeitabhängige Dehnung  $\varepsilon_k$  überschlägig extrapolieren zu können. In Analogie zu 3.2.3 kann so als Näherungswert die resultierende Gesamtverformung bzw. ein ungefährer aufzuschlagender Sicherheitsbeiwert bestimmt werden.

Tabelle 15: Im Tastversuch gemessene Verformungen der Wachse über die Zeit bei einer konstanten Belastung von 1 N/mm<sup>2</sup>

Wachs	Gesamtverformung ( $\epsilon_{el,0} + \epsilon_{k,10h}$ ) [%]	Anteil spontane elastische Dehnung $\epsilon_{el,0}$ [%]	Anteil nachwirkende zeitabhängige Dehnung $\epsilon_{k,10h}$ [%]	Verhältnis $\epsilon_{k,10h} / \epsilon_{el,0}$ [-]
PW 3146	0,67	0,4	0,27	0,4
CFW	2,39	0,8	1,59	1,98
CFW T40%	1,74	0,5	1,24	2,48
CFW C20%	1,75	0,45	1,3	2,88

Der reine Vergleich bzw. die Betrachtung des Verhältnisses zwischen spontanem elastischen  $\epsilon_{el,0}$  und nachwirkendem zeitabhängigen  $\epsilon_{k,10h}$  Dehnungsanteil (Tabelle 15) führt dabei besonders für das CFW Wachs zur Schlussfolgerung, dass die Annahme (vergl. 3.2.3) der Verteilung von  $\epsilon_{el,0}$  und  $\epsilon_{k,10h}$  zu gleichen Teilen ggf. nicht korrekt sein könnte und sich aus  $\epsilon_k$  größere Maßabweichungen bei den herzustellenden Betonbauteilen ergeben könnten. Bei der rückwirkenden Betrachtung der in diesen Tastversuchen gewonnenen Ergebnisse ist dabei zu berücksichtigen, dass der hier gewählte Versuchsaufbau aus der Betonprüfung abgeleitet wurde und für Wachse beim Einsatz als Schalungsmaterial aus den folgenden Gründen ggf. nicht den realen Umgebungsbedingungen und Belastungen entspricht:

- Die gewählte Belastung bzw. Spannung von 1 N/mm<sup>2</sup> liegt deutlich über der als maximal angesehenen maßgebenden Krafteinwirkung des Frischbetondrucks  $\sigma_{hd,max}$  von 0,25 N/mm<sup>2</sup> (vergl. 3.2.2).
- Die gewählte Belastung wurde über den gesamten Zeitraum von 10 h konstant gehalten, wohingegen sich die Belastung resultierend aus dem Frischbetondruck in der Realität rapide durch die Hydratation des Zementes abbaut [141]. So ist diese beim verwendeten Referenzbeton UHPC ND-2,5 nach z. B. 13 h kaum noch vorhanden (vergl. 3.2.1).
- Im durchgeführten Tastversuch ist die Querkontraktion des Wachses ungehindert, wohingegen sie in der Realität normalerweise durch die das Wachs tragende bzw. umschließende Stahl- oder Holzträgerunterkonstruktion behindert wird.

Basierend auf dieser Begründung kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss des Kriechens auf die erreichbare Präzision bei der Herstellung von Betonbauteilen mittels Wachsschalungen unter realen Bedingungen deutlich geringer und wahrscheinlich unkritischer ist, als es die Ergebnisse dieses Tastversuches vermuten lassen.

Für eine genauere, realitätsnahe Beurteilung werden weiterführende Untersuchungen empfohlen, bei denen z. B. die Belastung in Größe und zeitlichem Verlauf entsprechend realer an Schalungen mit Drucksensoren gemessener Ergebnisse aufgebracht wird.

Wie bereits bei den durchgeführten Versuchen zur Prismendruckfestigkeit (vergl. 3.3.4.1) zeigen auch diese Tastversuche den positiven Einfluss von Füllstoffen im CFW. Obwohl das Verhältnis  $\epsilon_{k,10h}$  zu  $\epsilon_{el,0}$  größer wird, zeigen die Absolutwerte, dass das Wachs durch die Zugabe von Füllstoffen nicht nur im elastischen Bereich steifer wird, sondern sich auch die nachwirkende zeitabhängige Dehnung  $\epsilon_{k,10h}$  bzw. der Einfluss des Kriechens verringert. Dieses Ergebnis unterstützt die Empfehlung im vorherigen Abschnitt, das Potential der Beimischung von Füllstoffen im Wachs für die Anwendung in der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie weiterführend zu untersuchen.

### 3.3.4.3 Zugfestigkeit

Auch wenn das Wachs planmäßig in der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie keinen reinen Zugspannungen ausgesetzt wird, wurden dennoch der Vollständigkeit halber Zugversuche an den Wachsen PW 3146 und CFW, jeweils mit und ohne zugegebenem Füllstoff 40 % Terephthalsäure, durchgeführt. Die Zugversuche wurden je Wachs dreifach bei den Temperaturen 0°C, 20°C und 30°C mit einer Vorkraft von 5 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min am ITE mit einer Zugprüfmaschine Typ Zwick/Roell BZ2,5/TS1S durchgeführt. Die gemäß ISO 527-2 definierten Probekörper vom Typ 1A wurden durch Einspritzen von geschmolzenem Wachs in eine erwärmte Aluminiumform (Abbildung 3-26, links) hergestellt. Die Probekörper wurden mit einer Länge von 115 mm eingespannt und besitzen eine Breite von 10 mm und eine Dicke von 4 mm. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-26, Mitte und rechts dargestellt.

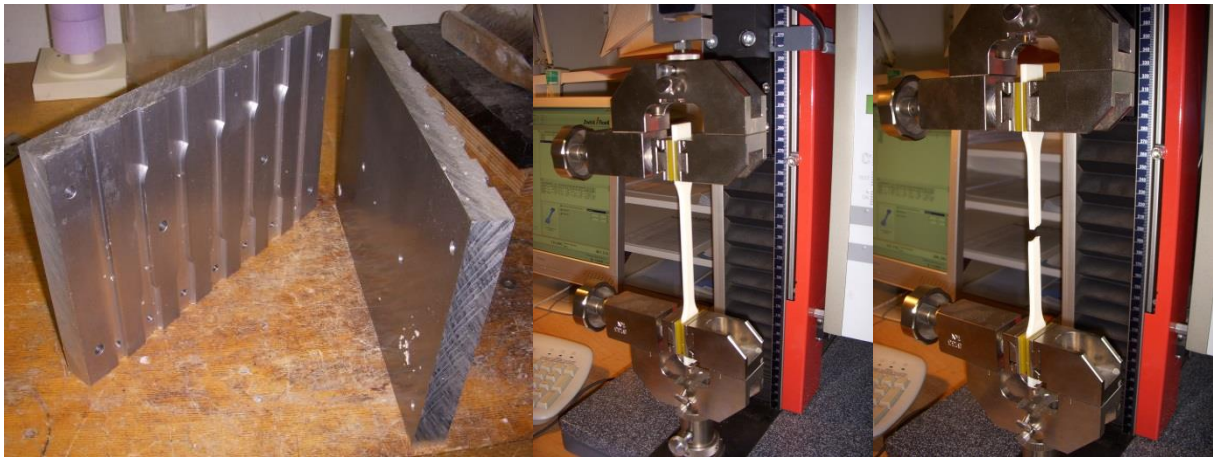


Abbildung 3-26: Aluminiumform zur Herstellung der Zugprobekörper (links), Prüfmaschine, Versuchsaufbau (Mitte) und gerissener Probekörper (rechts)

Die gemittelten Messergebnisse der Zugfestigkeitsprüfung sind in der nachfolgenden Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Versuchsergebnisse Zugprüfung – gemittelte Werte

Wachs	Prüf-temp. [°C]	Max.-last $F_{\max}$ [N]	$\sigma_{\max}$ bei $F_{\max}$ [MPa]	Dehnung $\varepsilon_1$ bei $F_{\max}$ [%]	Bruchlast $F_B$ [N]	Dehnung $\varepsilon$ bei $F_B$ [%]	Zugmodul* $E_t = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ [MPa]
CFW	0	163	4,1	1,07	162,50	1,07	74,38
CFW + T40%	0	244	6,4	1,37	244,00	1,37	88,75
PW 3146	0	200	5,0	0,73	196,50	0,73	106,25
PW 3146 + T40%	0	276	6,9	0,93	276,00	0,93	125,00
CFW	20	119	3,0	7,21	82,27	21,53	23,75
CFW + T40%	20	146	3,7	3,04	144,00	3,07	37,92
PW 3146	20	125	3,1	1,38	123,00	1,38	38,33
PW 3146 + T40%	20	232	5,8	1,73	232,00	1,73	74,58
CFW	30	114	2,9	10,34	100,53	14,68	20,00
CFW + T40%	30	126	3,2	3,21	121,00	3,24	34,17
PW 3146	30	101	2,5	1,87	101,20	1,87	27,92
PW 3146 + T40%	30	191	4,8	2,21	188,00	2,21	54,58

Der Zugmodul wurde jeweils zwischen  $\varepsilon_1 = 0,25 \%$  und  $\varepsilon_2 = 0,5 \%$  Dehnung und der dazugehörigen Spannung ermittelt. Bei den Zugprüfungen zeigten alle Wachse bei allen Temperaturen ein sprödes Bruchverhalten mit einem Trennbruch. Lediglich reines CFW verhielt sich elastischer und zeigte vor dem Bruch sich langsam vergrößernde Risse bzw. einen Einschnürbruch. Wie bereits bei der Prismendruckfestigkeit ist bei den Zugprüfungen ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und der Prüftemperatur zu beobachten. Mit steigender Temperatur nimmt bei allen Wachsen die Zugfestigkeit (Maximallast) und der Zug-E-Modul ab und die Duktilität bzw. die Dehnung nehmen zu. Im überschlägigen Vergleich der ermittelten Prismendruckfestigkeiten der Wachse CFW und PW 3146 mit Füllstoff liegen die ermittelten Zugfestigkeiten bei 20 und 30°C bei gleicher Dehnung jeweils niedriger. Dieses lässt sich ggf. auf die Anfälligkeit der Wachse gegenüber Kerbeffekten (z. B. resultierend aus Luftblasen an der Oberfläche der Proben) zurückführen.

Durch einen Vergleich der Versuchsergebnisse der jeweiligen Wachse mit und ohne Füllstoff wird auch bei der Zugprüfung der positive Einfluss von Füllstoffen auf die Festigkeiten der Wachse deutlich.

#### 3.3.4.4 Dynamisch-mechanische thermische Analyse (DMTA)

Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig wurde in Kooperation mit dem ITE eine dynamisch-mechanische thermische Analyse (DMTA) durchgeführt, wobei zur Messung des temperaturabhängigen komplexen Schubmoduls  $G$  Prüfkörper aus Wachs (Abmessungen: Länge 40 mm, Breite 9,7 mm, Höhe 4,4 mm) in einem zentrischen Drei-Punkt-Biegeversuch einer periodisch wechselnden sinusförmigen Beanspruchung (1 Hz) bei steigender Temperatur ausgesetzt wurden. Mithilfe eines DMTA-Systems Typ Mettler wurden an jeweils zwei Proben von PW 3146, CFW und CFW T40% (40 M% Terephthalsäure als Füllstoff) Versuche durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt. Da PW 3146 werkseitig mit 40 % Terephthalsäure als Füllstoff versetzt wurde, wurden als Referenz drei Proben CFW ebenfalls mit 40 % Terephthalsäure als Füllstoff versetzt (CFW T40%) und geprüft. Die Proben und der prinzipielle Versuchsaufbau sind in Abbildung 3-27 dargestellt.

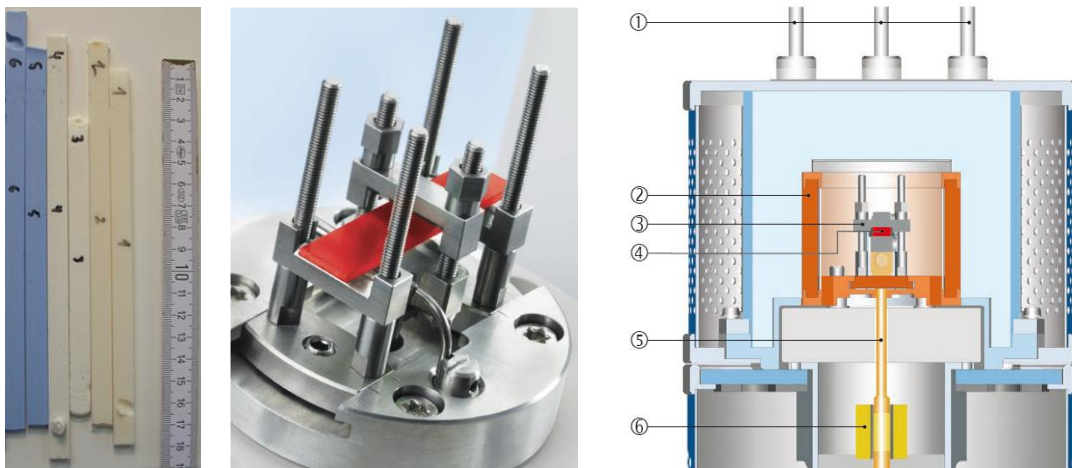


Abbildung 3-27: Probekörper 1+2 CFW, 3+4 CFW angereichert mit 40 % Füllstoff (Terephthalsäure), 5+6 PW 3146 werkseitig mit 40 % Terephthalsäure als Füllstoff versetzt (links), Probekörper des temperierten Drei-Punkt-Biegeversuchs (Mitte), Funktionsprinzip DMTA-System Typ Mettler: (1)  $\text{LN}_2$  Einlass / Auslass, (2) Heizelement, (3) Probenhalter, (4) Probe, (5) Anregungsstange, (6) Wegsensor (rechts) aus [142]

Die Ergebnisse der Messungen (Mittelwerte) für den Speichermodul  $G'$  und den Verlustmodul  $G''$  sind in Abbildung 3-28 dargestellt. Allgemein repräsentiert der Speichermodul ( $G'$ ) die elastische Steifigkeit eines Materials, während der Verlustmodul ( $G''$ ) ein Maß für die „viskose“ Schwingungsenergie ist, die in Wärme umgewandelt wird (Verlustanteil der Energie). Aus dem Verhältnis von Speichermodul  $E'$  zu Verlustmodul  $E''$  ergibt sich der Verlustfaktor Tangens Delta ( $\tan \delta$ ), der das viskoelastische Dämpfungsverhalten des jeweiligen Wachses über die Temperatur charakterisiert und in Abbildung 3-29 dargestellt ist.  $\tan \delta$  charakterisiert somit die mechanische Dämpfung oder innere Reibung des viskoelastischen Systems im Wachs.

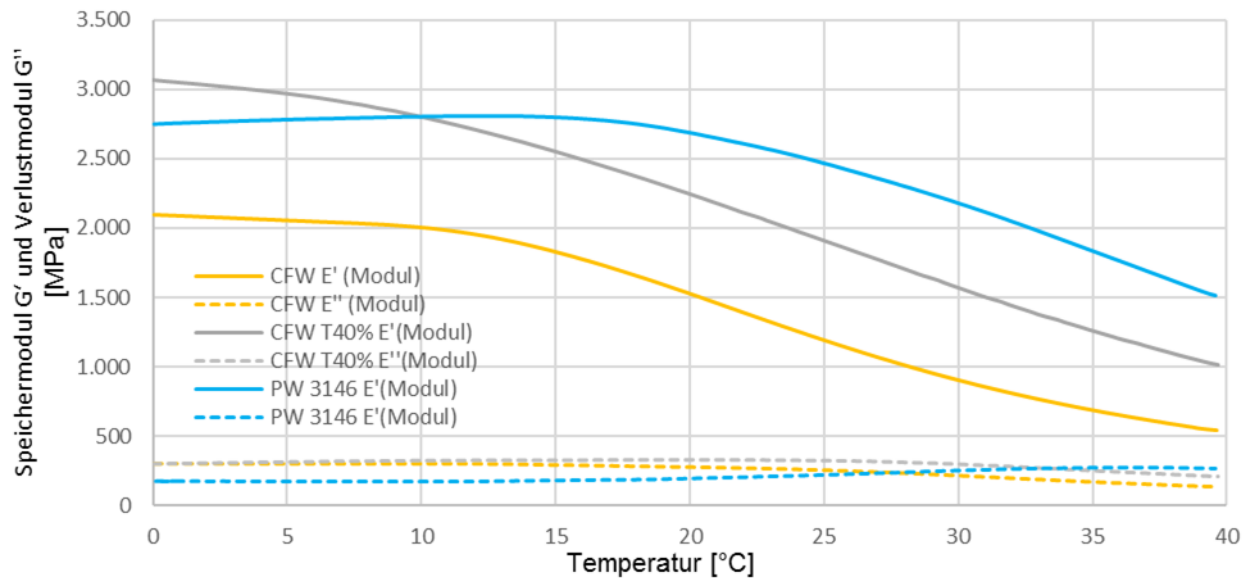


Abbildung 3-28: Temperatur-Speichermodul  $G'$  und Verlustmodul  $G''$ -Diagramm der Wachse PW 3146, CFW und CFW + T40% mittels DMTA

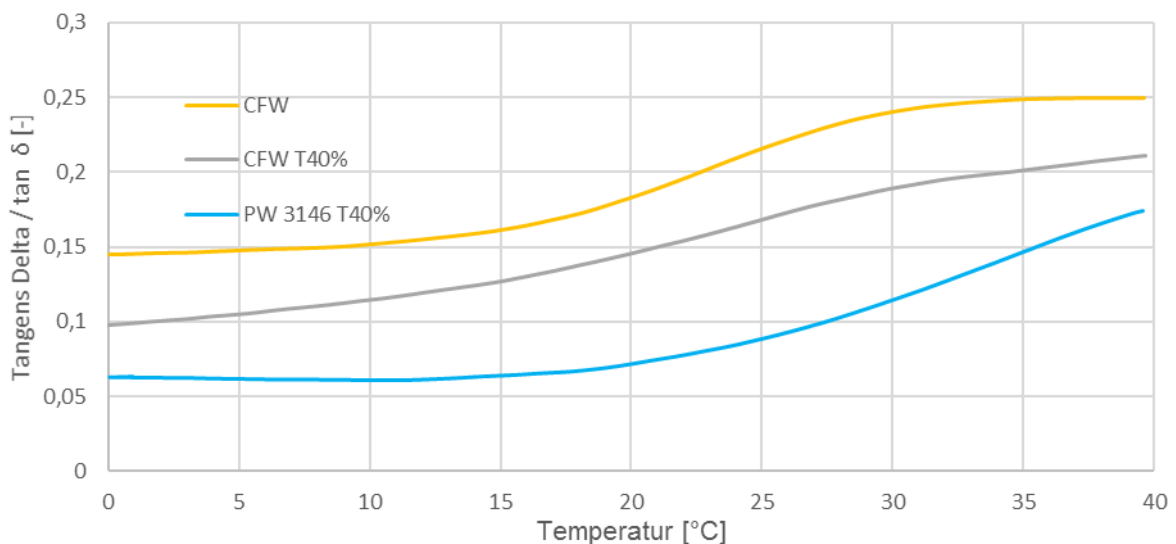


Abbildung 3-29: Temperatur-Verlustfaktor Tangens Delta ( $\tan \delta$ )-Diagramm der Wachse PW3146, CFW und CFW T40% aus Verhältnis von  $E'$  (Speichermodul) und  $E''$  (Verlustmodul)

Die Schubfestigkeit und die Messung des (komplexen) Schubmoduls  $G^*$  der Wachse ist im eigentlichen Sinne eher von nachrangigem Interesse für die Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie. Da die DMTA-Messungen aber ein relativ standardisiertes Prüfverfahren besonders für thermoplastische Kunststoffe darstellen, geben die damit gemessenen Änderungen des Speichermoduls  $G'$  und Verlustmoduls  $G''$  über die Temperatur eine qualitativ gute Möglichkeit des Vergleiches der charakteristischen mechanischen Eigenschaften von unterschiedlichen Wachsen über die Temperatur wieder. Wie beispielhaft am Vergleich der Verläufe der Graphen in Abbildung 3-28 der Wachse CFW und CFW T40% zu sehen ist, zeigt sich beim Speichermodul  $G'$  im Temperaturbereich zwischen 15°C und 35°C ein nahezu paralleler Verlauf, wobei der mit Füllstoffen versetzte CFW gegenüber reinem CFW eine deutlich höhere elastische Steifigkeit aufweist. Das Verlustmodul ( $G''$ ) des CFW mit Füllstoffen ist hingegen nur geringfügig höher als das des reinen CFW, welches sich in den geringeren Werten des Verlustfaktors  $\tan \delta$  (Abbildung 3-29) widerspiegelt. Der Füllstoff besitzt somit auch einen positiven Einfluss auf das Wachs bei höheren Temperaturen.

### 3.4 Zusammenfassung der Grundlagen, Analyse und Begründung der Selektion geeigneter technischer Wachse

Ziel des Kapitels 3 ist es, ein grundlegendes Verständnis von Wachs zu vermitteln, aus hergeleiteten Einflussgrößen ein detailliertes Anforderungsprofil für Wachse als Schalungsmaterial zu erstellen und dieses mit den analysierten physikalisch-mechanischen Eigenschaften untersuchter Wachse zu vergleichen. So können geeignete Wachse für die Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie selektiert werden.

Grundlegend steht die technologische Sammelbezeichnung Wachs für komplexe organische Stoffgemische, welche hinsichtlich ihrer chemischen Struktur den hochmolekularen organischen Verbindungen (Polymere wie z. B. Kohlenwasserstoffe) zugeordnet werden können. Auf der Ebene des Gefüges gehören Wachse zur Familie der (teil-)kristallinen Stoffe, die in Abhängigkeit ihrer chemischen Struktur und thermischen Vorgeschichte als Feststoff sowohl kristalline als auch amorphe Bereiche aufweisen können. Stark vereinfacht ausgedrückt lassen sich Wachse zwischen Ölen / Fetten und thermischen Kunststoffen ansiedeln.

Diese chemischen Strukturen und das Gefüge sind der Grund für die stark temperatur- und zeitabhängigen physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Wachse. Der thermische Gebrauchsbereich wird dabei durch die Glasübergangstemperatur  $T_G$  begrenzt. Unter Belastung ist das mit Temperaturzunahme steigende viskoelastische Verhalten des Wachses besonders zu beachten. Bei der Herstellung großformatiger spannungsarmer Wachsböcke als Rohlinge (Blanks) für die CNC Fräsbearbeitung ist die Abkühlgeschwindigkeit des Wachses zu berücksichtigen, da diese die Kristallinität und somit die mechanischen Eigenschaften des Wachses beeinflusst.

Als Grundlage für die Selektion eines geeigneten Wachses für die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie wurden relevante Einflussgrößen auf ein als Schalung dienendes Wachs ermittelt. Aus diesen Einflussgrößen wie u. a. Frischbetondruck im Bezug zur Hydratationswärme, Maßhaltigkeit, Oberflächengüte, herstellbares Formenspektrum, Wirtschaftlichkeit und dem Anspruch an Nachhaltigkeit wurde ein Anforderungsprofil definiert. Da Wachse nicht als Baustoff verwendet werden, werden ihre vielfältigen physikalisch-mechanischen bzw. „bautypischen“ Eigenschaften durch die Wachshersteller nicht ermittelt und müssen für den Abgleich mit dem Anforderungsprofil analysiert werden.

An 29 Wachsen wurde die prinzipielle Fräsbarkeit untersucht und für die 9 als fräsbar eingestuft. Wachse wurden die physikalisch-mechanischen Eigenschaften ermittelt. Aus den 9 Wachsen wurden **PW3146** und **CFW** für die weiterführenden Untersuchungen zur Entwicklung der Wachsschalungstechnologie ausgewählt. Dies lässt sich dabei wie folgt begründen: Werden die mit Terephthalsäure als Füllstoff angereicherten Wachse PW 3146, RC 252 und RC 253 betrachtet, liegen ihre physikalisch-mechanischen Eigenschaften prinzipiell nahe beieinander und erfüllen die gestellten Anforderungen (Tabelle 6) am besten. Z. B. besitzt das Wachs **PW 3146**

- eine hohe Tropfpunkttemperatur von 98°C (Schmelzpeak 81,8°C),
- einen hohen Onset-Wert der Aufwärmkurve von 46,7°C (max. Gebrauchstemperatur),
- die nahezu geringste thermische volumenspezifische Ausdehnung (fest 20°C zu flüssig  $T_P$ ) von 6,97 Vol.-%,
- die geringste Schmelzenergie 126,4 [J/g],
- eine hohe Biegezugfestigkeit 9,96 N/mm<sup>2</sup> und
- eine hohe Druckfließspannung von 7,6 N/mm<sup>2</sup> bzw. Druckspannung  $\sigma_x$  von 6,5 N/mm<sup>2</sup> (bei 20°C).

Da es zur Begrenzung des Umfangs der weiterführenden Untersuchungen und Entwicklungen sinnvoll ist, nur eines der drei sich ähnelnden mit Füllstoff angereicherten Wachse zu untersuchen, wird hierfür PW 3146 ausgewählt. Im Vergleich dazu neigt RC 252 im geschmolzenen Zustand teilweise zu einer Sedimentierung bzw. Entmischung des Füllstoffs und zu einem ungünstigen Entlüftungsverhalten,



welches zur Bildung von Lufteinschlüssen führt. RC 253 zeigt eine besonders signifikante Klebewirkung an der Schalung zur Erstellung der Wachsrohlinge und der Frässpäne an den Führungen und Lagern der verwendeten CNC Fräse.

Da der Einfluss des werkseitig beigefügten Füllstoffes Terephthalsäure in Bezug auf eine optimale Fräsbarkeit, die Dauerhaftigkeit der Führungen und Lager der CNC Fräsmaschinen und besonders das spätere Kontaktverhalten zum Beton (es handelt sich hierbei um ein saures Material) bisher noch ungeklärt sind, sollte ein weiteres, nicht gefülltes Wachs für die Eignung als Schalungsmaterial in den weiterführenden Untersuchungen verwendet werden.

Im Vergleich der untersuchten ungefüllten, reinen Wachse erscheint **CFW** am besten geeignet, da es

- eine ausreichende Tropfpunkttemperatur von etwa 73°C (Schmelzpeak 58,5°C),
- einen ausreichenden Onset-Wert der Aufwärmkurve von 41,9°C (max. Gebrauchstemperatur)
- die geringste ermittelte thermische volumenspezifische Ausdehnung (fest 20°C zu flüssig T<sub>P</sub>) von 11,91 Vol.-%,
- die geringste Schmelzenergie 233,5 J/g,
- eine Biegezugfestigkeit von 5,57 N/mm<sup>2</sup> und
- eine Druckfließspannung von 3,3 N/mm<sup>2</sup> bzw. Druckspannung  $\sigma_x$  von 2,5 N/mm<sup>2</sup> (bei 20°C) aufweist.

Gegenüber diesen Vorteilen erscheint bei CFW der geringe Biege- bzw. Druck E-Modul als nachteilig, da dieser unter Belastung durch z. B. Frischbeton zu einer höheren Verformung und somit zu einer Verringerung der erreichbaren Präzision führt. Die größere Elastizität bzw. Duktilität führt allerdings gleichzeitig zu einer größeren Robustheit des Wachses gegen z. B. mechanische Stoßbelastungen beim Ausschalen eines erhärteten Betonbauteils. Da ansonsten alle Anforderungen für CFW erfüllt sind und die anderen untersuchten ungefüllten Wachse dazu als relativ spröde einzustufen sind, wird für die weiterführenden Untersuchungen CFW ausgewählt.

Auf Basis der beiden ausgewählten Wachse PW 3146 und CFW wurden weiterführende Untersuchungen durchgeführt, bei denen der Fokus auf dem Einfluss der Temperatur und von beigemischten Füllstoffen liegt. Aus der Analyse der Prismendruckfestigkeit, des Zeitstandverhaltens, der Zugfestigkeit und des Schubmoduls lassen sich dabei folgende Schlüsse ziehen:

**Temperatur:** Die Druckfließspannung  $\sigma_y$  und der Druck E-Modul nehmen mit steigender Temperatur ab bzw. mit sinkender Temperatur zu. Als grober Richtwert bedeutet dies für das Wachs CFW, dass sich die Druckfließspannung  $\sigma_y$ , ausgehend von etwa 10°C je Temperaturzunahme, um 10°K etwa halbiert. Die ermittelten Zugfestigkeiten lagen jeweils niedriger als die Druckfestigkeiten und auch hier wurde ein ähnlicher Einfluss der Temperatur festgestellt. Zur Sicherstellung der Standsicherheit von Wachsschalungen wird daher empfohlen, hohe Hydratationstemperaturen im Zusammenspiel mit hohen Frischbetondrücken zu vermeiden.

**Zeitstandfestigkeit:** Die Versuche zeigen deutlich das plasto-elastische Verhalten der Wachse. Das für CFW bei 20°C versuchstechnisch ermittelte Verhältnis  $\epsilon_{k,10h} / \epsilon_{el,0}$  von etwa Faktor 2 erscheint dabei zwar relativ hoch, begründet sich aber auf eine zu hoch gewählte zeitlich konstante Versuchsbelastung. Bei Berücksichtigung von realeren Belastungen und ihrer zeitlichen Abnahme wird erwartet, dass das Verhältnis eher der Annahme (vergl. 3.2.3) von Faktor 1 entspricht und somit der Einfluss des Kriechens unkritisch für Wachsschalungen aus CFW ist.

**Füllstoffe im Wachs:** Bei CFW erhöhte sich bei 20°C durch Zugabe von 20 M% Rohzellulose die Druckfließspannung um 70 % und der E-Modul um über 100 %. Ebenfalls erhöhte sich die Zeitstandfestigkeit, und die Analyse des Speichermoduls  $G'$  zeigt, dass dieser positive Einfluss auch bei höheren Temperaturen Bestand hat. Die Zugabe von Füllstoffen führt zu einer deutlichen Verbesserung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Wachse und bietet daher enormes Potential für die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie, welches in weitestführenden Untersuchungen unbedingt erforscht werden sollte.

## 4 Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie

### 4.1 Prozessrelevante Begleituntersuchungen und Versuche

#### 4.1.1 Herstellung großformatiger spannungsarmer Wachsblöcke

Die Herstellung bzw. der Guss von großformatigen spannungsarmen Wachsblöcken als Rohlinge (engl. Blanks) für die CNC Fräsbearbeitung stellt, wie bereits bei den Verfahren von Gramazio / Kohler (vergl. 2.4.1.3) und Gardiner (vergl. 2.4.3.4) beschrieben, aufgrund der bei Wachs stark ausgeprägten thermischen volumenspezifischen Ausdehnung bzw. dem Schrumpf (vom flüssigen zum festen Zustand bei 20°C, vergl. 3.3.3.3) eine verfahrenstechnische Herausforderung dar. Um zudem die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie auch aus ökonomischer Sicht im Gesamtprozesses wirtschaftlich zu gestalten, müssen die Wachsblöcke nicht nur möglichst spannungs-, riss- und verzugsfrei kubisch, sondern auch einfach und schnell herzustellen sein (vergl. 2.6). Als Wachs für die in diesem Kapitel beschriebenen Versuchsreihen wurde ausschließlich CFW verwendet, da dieses nicht mit Füllstoffen versetzt ist und die zu erforschenden Herstellungsmethoden prinzipiell auf alle ungefüllten Wachse anwendbar sein soll.

##### 4.1.1.1 Direktes Gießen von heißem flüssigen Wachs

Basierend auf den theoretischen Vorüberlegungen (vergl. 3.1.3.1) wurden im ersten Ansatz kleinformative Wachsblöcke (Abmessung 300 x 300 mm, Höhe 100 mm) durch direktes Gießen des heißen flüssigen Waxes in Holzformen mit anschließendem möglichst schnellen Abkühlen hergestellt. Hierdurch sollte nicht nur eine kurze Produktionszeit gewährleistet werden, sondern auch Wachsblöcke mit stärker amorphen, „glasartig erstarrten“ Bereichen und einer daraus resultierenden geringeren thermischen Volumenausdehnung hergestellt werden. Leider führte dieser Ansatz nicht zum gewünschten Ergebnis, sondern die so hergestellten Wachsblöcke (Abbildung 4-1) zeigten jeweils eine starke Rissbildung, die sich auch nicht mit heißem flüssigen Wachs wieder lunkerfrei vergießen ließen.



Abbildung 4-1: Wachsblock aus CFW Wachs (Abmessungen 300 x 300 mm, Höhe 100 mm), gegossen in eine Form aus beschichteten Fumiersperrholzplatten (20°C) mit einer anschließenden schnellen Abkühlung über eine Stunde bei 0°C Umgebungstemperatur, Draufsicht mit starker Rissbildung am rechten Rand (links), Ansicht des mittig aufgesägten Blocks (rechts)

Da Wachse wie CFW eine hohe spezifische Wärmekapazität (vergl. 3.3.3.1) und zudem eine geringe Wärmeleitfähigkeit (vergl. 3.3.3.2) aufweisen, wird die Abführung der Wärmeenergie aus dem Inneren des Wachsblocks mit zunehmender Größe immer schwieriger. Wie unter anderem bereits bei der Herstellung der zylindrischen Wachs-Versuchskörper (vergl. 3.3.3.5) festgestellt wurde, führt dies dazu, dass sich beim Abkühlen an den Außenseiten des Wachsblocks bereits erstarrtes Material bildet, welches das im Inneren noch im flüssigen Zustand vorliegende Wachs am Schwinden bzw.

Zusammenziehen hindert. Durch dieses Ungleichgewicht beim Abkühlen des Wachsblocks entstehen in den Außenschichten Druckspannungen und im inneren Kern Zugspannungen (thermisch bedingte innere Spannungen). Wird der Wachsblock durch eine sehr niedrige Außentemperatur schnell abgekühlt, entsteht ein starker Temperaturgradient, der diesen Effekt bzw. die entstehenden inneren Spannungen verstärkt. Dies führt zu Verformungen oder es kommt bei Überschreitung der Zugfestigkeit zum Aufreißen des Wachses (Abbildung 4-1).

In einem zweiten Ansatz wurden daher ebenfalls kleinformatige Wachsblöcke (Abmessung 300 x 300 mm, Höhe 100 mm) durch direktes Gießen des heißen flüssigen Wachses in vorgeheizte Holzformen (40°C) mit anschließendem möglichst langsamen Abkühlen hergestellt. Hierzu wurde das in Formen gegossene Wachs in einem Versuchsofen innerhalb von 12 Stunden von 60°C auf 20°C Umgebungstemperatur abgekühlt. Dieser Ansatz führte zu homogenen Wachsblöcken (Abbildung 4-2) ohne Risse, allerdings mit auf der oberen Fläche starken und an den Seiten leichten konkaven Oberflächenwölbungen, die im Folgenden durch Planfräsen egalisiert werden mussten.

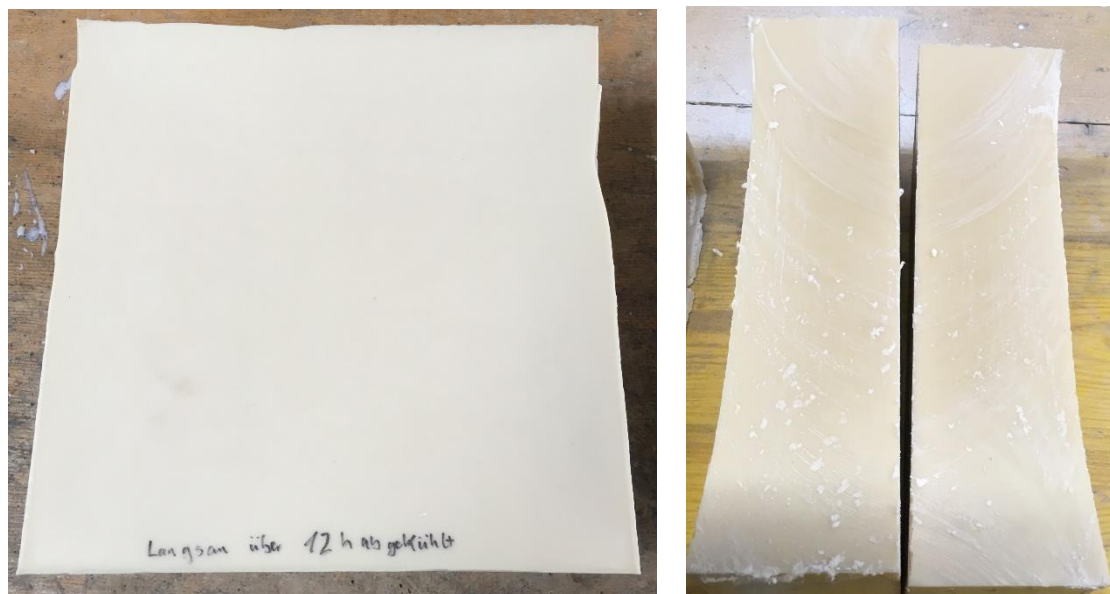


Abbildung 4-2: Wachsblock aus CFW Wachs (Abmessungen 300 x 300 mm, Höhe 100 mm), gegossen in eine Form aus beschichteten Furniersperrholzplatten (40°C) mit einer anschließenden langsamen Abkühlung über 12 Stunden von zuerst 60°C auf 20°C Umgebungstemperatur, Draufsicht (links), Ansicht des mittig aufgesägten Blocks (rechts)

Da die Zielgröße der Wachsschalungsmodule zur Anwendung im Betonbau etwa 1 m x 1 m x 1 m beträgt, werden für ihre Herstellung großformatige, homogene und spannungsarme Wachsblöcke mit eben diesen Abmessungen benötigt. Um die Übertragbarkeit des im kleinen Maßstab erfolgreichen zweiten Ansatzes auf die Herstellung größerer Wachsblöcke zu überprüfen, wurde ein Wachsblock aus CFW Wachs mit den Abmessungen 1200 x 400 mm und 100 mm Höhe gegossen (Abbildung 4-3, links) und anschließend innerhalb von 12 Stunden von 60°C auf 20°C Umgebungstemperatur abgekühlt.

Um wie bei den kleinformatigen Wachsblöcken einen Verbund mit der als Formboden und Trägerplatte verwendeten 21 mm dicken, beschichteten Furniersperrholzplatte herzustellen, wurden in diese vor dem Guss 30 mm lange Holzbauschrauben von unten her eingeschraubt. Nach dem Abkühlen zeigte der gegossene Wachsblock (Abbildung 4-3, oben) an der Oberseite eine leicht konkave Oberfläche und keine Risse, dafür aber ein signifikantes Aufwölben, sodass die Trägerplatte nicht auf einem Vakuumaufspanntisch fixiert und der Block nicht verwendet werden konnte. Dieses Beispiel zeigt die skalierungsbedingte Problematik bei der Übertragung der Ergebnisse aus den kleinmaßstäblichen Versuchen auf die Herstellung großer Wachsblöcke. Sind die inneren Spannungen und Verformungen bei den kleinen Wachsblöcken noch gering und somit unproblematisch, nehmen diese trotz des langsamen Abkühlens bei großen, direkt gegossenen Wachsblöcken deutlich zu und führen zu starken inneren Spannungen und Verformungen. Nicht nur für die Homogenität und Fixierung, sondern auch für die Formstabilität der Wachsschalungen nach der Fräsbearbeitung stellen diese starken inneren

Spannungen ein großes Problem dar. Wird z. B. in der Fräsbearbeitung die äußere unter Druck stehende Schicht (Abbildung 4-3, Mitte) entfernt, können sich die inneren Spannungen umlagern und zu einem starken ungewollten Verzug der Wachsschalung führen (Abbildung 4-3, unten). Da sich diese inneren Spannungen und Verformungen ebenfalls beim direkten Guss auf einer Gleitschicht ohne Verbund mit der Trägerplatte einstellen, wurden im Folgenden alternative Herstellungsmöglichkeiten untersucht.

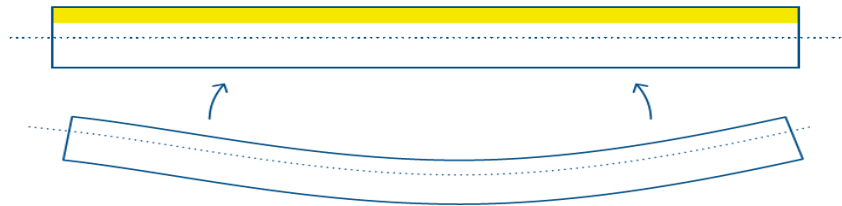
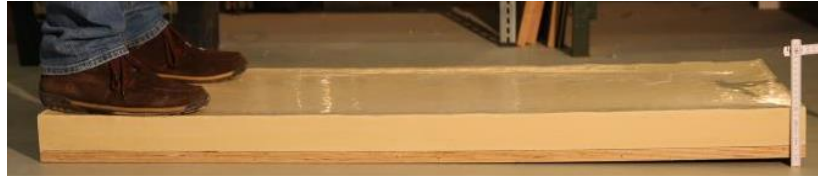


Abbildung 4-3: Guss eines Wachsblocks aus CFW Wachs (Abmessungen 1200 x 400 mm, Höhe 100 mm), gegossen in eine Form aus beschichteten Furniersperrholzplatten (40°C) mit einer anschließenden langsamen Abkühlung über 12 Stunden von zuerst 60°C auf 20°C Umgebungstemperatur (links), hergestellter abgekühlter Wachsblock, der eine ungewollte Krümmung / Verformung aufweist (oben), Prinzipskizze für die Verzugsproblematik durch einseitige Bearbeitung von Wachsen mit inneren Spannungen – Druckbereich im Material gelb markiert (Mitte), Verzug nach einem Entfernen des gelben Bereichs durch CNC Fräsen (unten)

#### 4.1.1.2 Tempern und plastisches Umformen des Wachses

U.a. in der Zahntechnik sowie in der Kunststoffindustrie werden Form- und Fertigteile aus Kunststoff (meistens extrudiert) zur Verringerung der inneren Spannung getempert, also einer nachträglichen Wärmebehandlung unterzogen. Dabei wird das Material langsam auf ein werkstoffspezifisches Temperaturniveau (etwa Kristallisationstemperatur) erwärmt, dort gehalten und langsam wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Durch die Wärme können sich die Kohlenwasserstoffketten (Polymere) bzw. die Kristalle umlagern, wodurch die inneren Spannungen reduziert werden. Um zu untersuchen, wie sich das Prinzip des Temperns auf die Herstellung von spannungsarmen und verzugsfreien kubischen Wachsböcken transferieren lässt, wurde dieser Ansatz bei der Herstellung der kleinformatigen prismatischen Wachsprobekörper für die durchgeführten Biegezugversuche (vergl. 3.3.3.4) angewendet. Hierzu wurden mit heißem flüssigen CFW Probekörper gegossen und nach dem Abkühlen langsam wieder auf etwa 50°C (entspricht etwa der Glasübergangstemperatur) erwärmt. Da die gegossenen Probekörper eingefallene konkave Oberflächen oder nicht parallele Seitenwände aufwiesen, wurden sie in diesem plastisch formbaren Zustand in Form gepresst bzw. umgeformt. Obwohl die so hergestellten Wachsprobekörper keine sichtbaren Risse und eine gute kubische Form mit ebenen Seiten aufwiesen, zeigten die ermittelten Biegezugfestigkeiten einen deutlichen Festigkeitsverlust, weswegen der Ansatz zusammen mit dem hohen prozesstechnischen Aufwand des Umformens nicht weiterverfolgt wurde.

Wird die thermische volumenspezifische Ausdehnung von z. B. CFW mit Bezug zur Temperatur 20°C betrachtet, beträgt diese im flüssigen geschmolzenen Zustand bei 80°C etwa 12 Vol.-%, im plastisch formbaren Zustand, oberhalb von  $T_G$  bei 50°C, hingegen nur etwa 4 Vol.-%. Da die inneren thermischen Spannungen in Abhängigkeit zu dieser Kontraktion stehen, scheint es dennoch grundlegend sinnvoll zu sein, Wachs nicht im flüssigen, sondern im plastisch formbaren Zustand in seine endgültige Form zu bringen. Unter Variation der Parameter Druck und Temperatur könnte es so möglich sein, eine für die Schalung ausreichende Festigkeit des Wachses zu erreichen und dennoch homogene, spannungsfreie und ebene Wachsböcke herzustellen. Es wird empfohlen, diesen Ansatz in weiterführenden Versuchen nochmals genauer zu untersuchen.



### 4.1.1.3 Lagenweises Gießen von Wachs

Aus der manuellen Herstellung von großformatigen Kerzen ist bekannt, dass diese in einzelnen dünnen Lagen gegossen werden, um den thermischen Schwund des Wachses zu kompensieren. In einem Versuch wurde daher ein kleinformatiger Wachsblock aus jeweils 2 cm dicken Wachslagen hergestellt, indem auf die jeweils auf Raumtemperatur abgekühlte Wachslage neues heißes flüssiges CFW aufgegossen wurde. Obwohl hierdurch ein Wachsblock mit einer guten kubischen Form mit ebenen Seiten hergestellt werden konnte, zeigte sich bei der anschließenden Fräsbearbeitung des Wachsblocks ein unzureichender Verbund zwischen den einzelnen gegossenen Lagen. Durch die horizontalen Prozesskräfte des Fräasers scherten einzelne Teile der gefrästen Strukturen in den Gussfugen ab. Aufgrund dieses als unzureichend angesehenen Verbundverhaltens wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt. Da die gussglatte Oberfläche des Wachses hierfür verantwortlich zu sein scheint, sollte in weiterführenden Versuchen versucht werden, die Oberfläche der gegossenen Wachslagen mechanisch anzurauen oder direkt vor dem Guss kurzzeitig stark zu erhitzen, um so ein besseres Verbundverhalten zu erreichen.

### 4.1.1.4 Wachsinjektion

Aus der Schmuckherstellung ist bekannt, dass Wachs zur Herstellung von Positivmodellen für den Metallfeinguss in z. B. Silikonformen mittels Wachsinjektoren gefüllt wird. Dabei wird in einem heizbaren Kessel das Injektionswachs geschmolzen und mit Hilfe von Druckluft durch eine heizbare Injektionsdüse in die Formen gespritzt. Obwohl dieses Verfahren aufgrund des thermischen Schwundes bisher nur für kleinmaßstäbliche Formen verwendet wird, wurde daraus der Ansatz abgeleitet, geschmolzenes Wachs unter Druck in eine Form zu injizieren, um so großformatige Wachsblöcke herzustellen. Wie schematisch in Abbildung 4-4 links dargestellt, wird hierzu in eine allseitig geschlossene Form 80°C warmes und geschmolzenes Wachs unter Druck über ein beheiztes Rohr eingeleitet bzw. in den Kern injiziert. Da die Abkühlung und somit das Erstarren des Wachses von außen nach innen erfolgt, soll durch das Nachpressen von geschmolzenem Wachs die Volumenabnahme im Kern kompensiert bzw. die Fehlstellen wieder aufgefüllt werden. Zur Überprüfung des Ansatzes wurde der in Abbildung 4-4, rechts dargestellte Versuch durchgeführt und mittels Temperaturmessung an verschiedenen Stellen des Wachsblockquerschnitts überwacht.

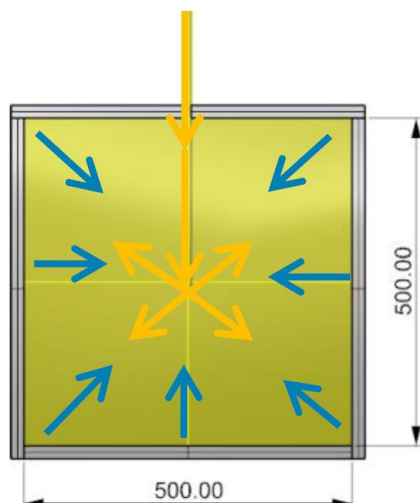


Abbildung 4-4: Wachsinjektion – Versuchsaufbau zur Injektion von Wachs zur Erstellung eines Wachsblocks mit den Abmessungen 500 x 500 x 500 mm: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips; blaue Pfeile – Abkühlrichtung / gelbe Pfeile – Fließrichtung des heißen flüssigen Wachses (links), Versuchsaufbau mit Form aus beschichteten Furniersperrholzplatten, in dessen Kern über eine beheizte Rohrleitung heißes flüssiges Wachs mit 85°C aus dem oberen Schmelzkessel über hydrostatischen Druck injiziert wird (rechts)

Der durchgeführte Versuch lieferte dabei folgende Erkenntnisse:

- Bei einer Raumtemperatur von 20°C benötigte der Wachsblock etwa 4 Tage, bis sein Kern ebenfalls auf 20°C abgekühlt war.
- Nach dem Entformen zeigte der Wachsblock an den Außenseiten keine Risse und eine gute kubische Form mit ebenen Seitenflächen (Abbildung 4-5, links).
- Nach dem Aufsägen zeigte der Wachsblock im Kern eine starke Hohlraum- und Rissbildung.

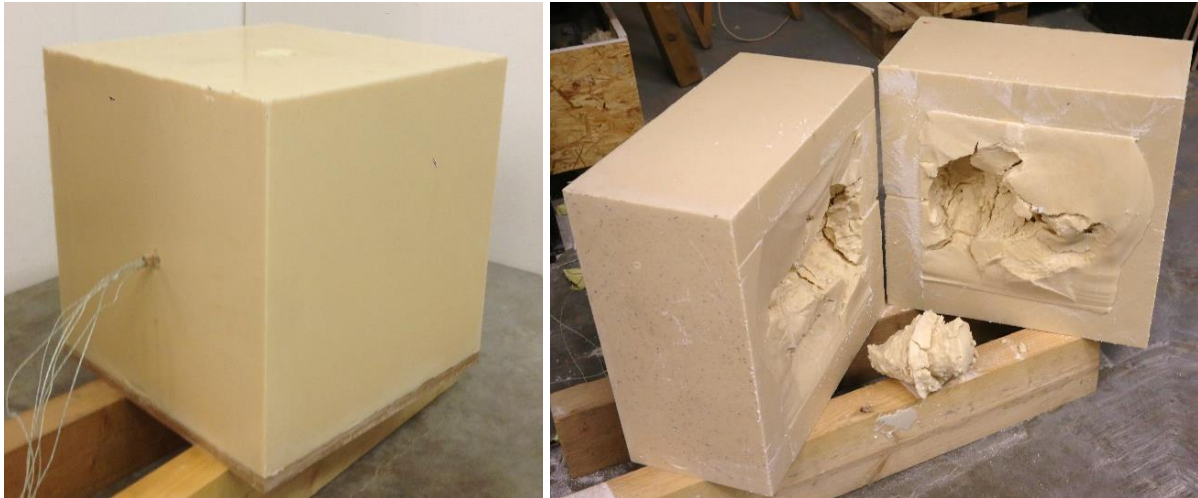


Abbildung 4-5: Wachsinjektion – nach dem Abkühlen ausgeschalteter Wachsblock mit planaren Seiten und Abmessungen 500 x 500 x 500 mm (links), aufgesägter Wachsblock mit starker Hohlraumbildung im Kern (rechts)

Äußerlich betrachtet können mit diesem Ansatz sehr formtreue Wachsböcke hergestellt werden, die sich auch ohne weiteres zu einem größeren, passgenauen Verbund zusammenfügen ließen. Die im Kern festgestellte Hohlraum- und Rissbildung schließt aber eine Verwendung als Rohling für die Herstellung von Wachsschalungen aus und lässt sich wahrscheinlich u. a. auf folgende Ursachen zurückführen:

- Der Druck des injizierten Wachses war nicht ausreichend hoch.
- Die Temperatur des Wachses oder die der Rohrleitung am Injektionspunkt im Kern war nicht ausreichend hoch, sodass sich im Kern ein „Pfropfen“ gebildet hat, der die Leitung verschlossen hat.

Obwohl diese Ursachen durch weiterführende Entwicklungen wahrscheinlich behoben werden könnten, wird die verfahrensbedingte reine Abkühlzeit von 4 Tagen als kritisch für eine wirtschaftliche Herstellung von Wachsböcken angesehen und dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

##### 4.1.1.5 Verguss von bereits erkalteten Wachstafeln

Bei Beton wird das Schwinden, also die Volumenverminderung, durch die Hydratation des Zementleims verursacht und dabei maßgebend vom Volumen und von der Zusammensetzung des eingesetzten Zuschlags bestimmt. Da bereits erkaltetes Wachs keiner thermischen Volumenminderung mehr unterliegt, wurde in diesem Ansatz untersucht, ob sich dieser Effekt des Zuschlags im Beton auf die Herstellung von großformatigen Wachsböcken übertragen lässt. Es wird dabei erwartet, dass sich in Analogie zum Zuschlag im Beton die thermische Volumenminderung der Böcke durch den Verguss von bereits erkaltetem Wachs mit geschmolzenem Wachs deutlich reduzieren lässt. Im ersten dazu durchgeführten Tastversuch wurden Wachsvollkugeln und -halbkugeln in Silikonformen gegossen (Abbildung 4-6, links), die nach dem Abkühlen in einer kleinformatigen Form chaotisch angeordnet und mit geschmolzenem Wachs vergossen wurden (Abbildung 4-6, Mitte). Anhand des in Lagen abgefrästen Wachsblocks (Abbildung 4-6, rechts) konnte Folgendes festgestellt werden:



- Gegenüber einem direkt gegossenen Wachsblock konnten die thermische Volumenminderung und die Zeit zum Abkühlen deutlich reduziert werden.
- Der Verbund zwischen den Wachskugeln und dem Vergusswachs stellte sich teilweise als sehr mangelhaft heraus und einzelne Halbkugeln ließen sich leicht herauslösen. Ggf. lässt sich dieses auf das noch an den Wachskugeln verbliebene Silikontrennmittel aus ihrer Herstellung zurückführen.
- In einigen Bereichen mit großem Abstand zwischen den Wachskugeln konnten kleine Risse im Vergusswachs festgestellt werden.



Abbildung 4-6: Verguss von Wachskugeln: Schalung mit eingefüllten Kugeln aus CFW (links), Vergießen der Kugeln mit 85°C heißem CFW Wachs (Mitte), Plangefräster Probekörper mit erkennbarer Lunkerbildung und kleinen Rissen (rechts)

Um den ungünstigen Effekt des Silikonsprays auszuschließen, wurden daher für den zweiten Versuch kleinformatige CFW-Wachsblöcke durch Gießen in kalte Betonprobewürfelformen aus Stahl hergestellt. Aufgrund des kalten Stahls bildet sich beim Guss an der Kontaktfläche zum geschmolzenen Wachs sofort eine erkaltete Oberflächenschicht, die ein Anhaften verhindert und so die Verwendung von Trennmittel überflüssig macht. Obwohl die Wachsblöcke durch das schnelle Abkühlen in der Stahlform verziehen bzw. aufschüsseln (Abbildung 4-7, links), kann durch ihr rechteckiges Format der Abstand zwischen den Wachsblöcken bzw. die Größe der Vergussfugen reduziert werden, um eine Rissbildung zu vermeiden. Des Weiteren wurden die Abmessungen des herzustellenden Wachsblocks erhöht (Abmessung 500 x 500 mm, Höhe 120 mm), um mögliche Skalierungseffekte zu berücksichtigen. Anhand des so hergestellten großformatigen Wachsblocks, der in Stufenform abgefräst wurde (Abbildung 4-7, rechts), konnte Folgendes festgestellt werden:

- Die thermische Volumenminderung des hergestellten Wachsblocks wurde ebenfalls deutlich reduziert.
- Besonders bei breiten Vergussfugen zeigten die vergossenen Wachsblöcke einen sehr guten Verbund mit dem Vergusswachs.
- In den Bereichen mit sehr schmalen Vergussfugen bzw. bei eng aneinanderliegenden Wachsblöcken ist der Verbund hingegen mangelhaft und es zeigen sich größere Risse und Lunker.

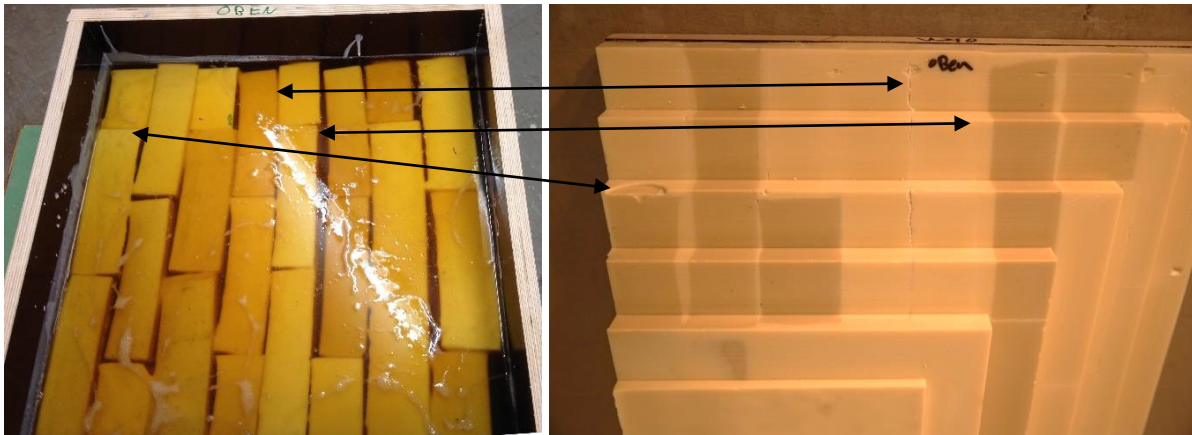


Abbildung 4-7: Mit heißem CFW vergossene kleinformige CFW-Wachsblöcke mit den Abmessungen 200 x 100 x 50 mm, welche durch sehr schnelles Abkühlen in einer Stahlform hergestellt wurden (links), am stufenförmig abgefrästen Wachsblock mit den Abmessungen 500 x 500 mm und einer Höhe von 120 mm sind diverse Risse zwischen den vergossenen kleinformigen CFW Wachsblöcken erkennbar (rechts)

Aus diesen Feststellungen lässt sich ableiten, dass sich rechteckige Wachsblockformate deutlich besser für den Verguss eignen als Kugelformen und dass dabei die Breite der Vergussfuge einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des hergestellten Wachsblocks hat. Der mangelhafte Verbund in schmalen Vergussfugen scheint darin begründet, dass das Vergusswachs beim Einfließen in diesen Bereichen zu schnell abkühlt und daher nicht in der Lage ist, die Oberfläche der Wachsblöcke ausreichend aufzuschmelzen, um eine stoffschlüssige Verbindung herzustellen. Ist die Vergussfuge hingegen breit genug, besitzt das einfließende Vergusswachs genügend Wärme, um mit den angrenzenden Wachsblöcken eine stoffschlüssige Verbindung durch Verschmelzen herzustellen. Problematisch ist dabei, dass aufgrund der thermischen Volumenminderung beim Abkühlen des Waxes Zugspannungen in der Fuge entstehen, welche durch eine Zugdehnung in den angrenzenden Wachsblöcken aufgenommen werden müssen. Sind die Vergussfugen zu breit und die Zugspannungen zu hoch, reißt die Vergussfuge selbst, der angrenzende Wachsblock oder die nächstliegende Fuge auf. Die Vergussfugen dürfen daher weder zu schmal noch zu breit sein. Damit die Vergussfuge eine definierte und exakte Breite hat, müssen die zu vergießenden verwendeten Wachsblöcke daher eine ebene Oberfläche und keine Krümmung aufweisen. Zur Herstellung solcher im Folgenden Wachstafeln genannter Wachsblöcke hat sich das folgende Verfahren als geeignet herausgestellt:

1. In einer von außen wassergekühlten, stehenden Stahlform (Abbildung 4-8, links) wird aus den Schmelzkesseln über Schläuche luftblasenfrei geschmolzenes Wachs eingefüllt. Aufgrund der thermischen Volumenminderung sollte während des Abkühlens in Intervallen geschmolzenes Wachs in die Stahlform nachgefüllt werden, da ansonsten ggf. in den oberen 5–10 cm der Wachstafel Risse entstehen, sodass dieser Bereich nicht verwendet, abgesägt und wieder eingeschmolzen werden muss.
2. Nach dem Abkühlen (etwa 2 Stunden) wird die Form geöffnet und die hergestellte Wachstafel (Abbildung 4-8, Mitte) entnommen.
3. Mit einer Tisch- oder Handkreissäge mit verschränkten Sägeblattzähnen werden die Wachstafeln auf die gewünschte Länge und Breite zugesägt.
4. Da die Seiten der Wachstafeln im Abkühlprozess leicht konkav einfallen und daher die Tafeln eine schwankende Dicke zwischen 50 und 48 mm aufweisen, werden sie mit einem konventionellen Dickenhobel auf die Dicke von 45 mm gebracht (Abbildung 4-9, links) und besitzen anschließend eine ebene Oberfläche.
5. Alle in diesem Prozess anfallenden Späne und Verschnitte können direkt wieder eingeschmolzen werden.

#### 4. Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie



Abbildung 4-8: Gießen von Wachstafeln in einer gekühlten Stahlschale (links), hergestellte Wachstafel aus CFW Wachs mit den Abmessungen 1000 x 600 mm mit einer Dicke zwischen 50 und 48 mm (Mitte), Zerschchnitt der Wachstafeln mit einer konventionellen Handkreissäge (rechts)



Abbildung 4-9: Beidseitiges Hobeln der zugesägten CFW Wachstafeln mit einem konventionellen Dickenhobel auf eine Sollstärke von 45 mm (links), einseitig gehobelte Wachstafel (rechts)

Zur Ermittlung einer optimalen Vergussfugenbreite wurden die so hergestellten 45 mm dicken Wachstafeln in eine beschichtete Furniersperrholzplattenform unter Variation der Vergussfugenbreiten (5 bis 23 mm in 3 mm Schritten) eingebracht und mit 100°C heißem Wachs vergossen (Abbildung 4-10, links). Anhand des so hergestellten großformatigen Wachsblocks, der in Stufenform abgefräst wurde (Abbildung 4-10, rechts), zeigt sich:

- Ab einer Vergussfugenbreite von 14 mm sind erste deutliche Risse zu erkennen.
- Eine Vergussfugenbreite von 5 mm ist ausreichend, um durch Aufschmelzen eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Wachstafeln zu erzeugen, und wird daher als Optimum für diesen Prozess erachtet.
- An den Seiten der Form sollte darauf geachtet werden, immer mit einer Wachstafel und nicht mit einer Vergussfuge an die Wand der Form anzuschließen. Einerseits wird hierdurch das Entfernen der Form erleichtert und andererseits entzieht die kalte Wand der Form dem Vergusswachs zu viel Wärme, sodass dieser keinen stoffschlüssigen Verbund mit der Wachstafel mehr eingeht und Risse entstehen können.

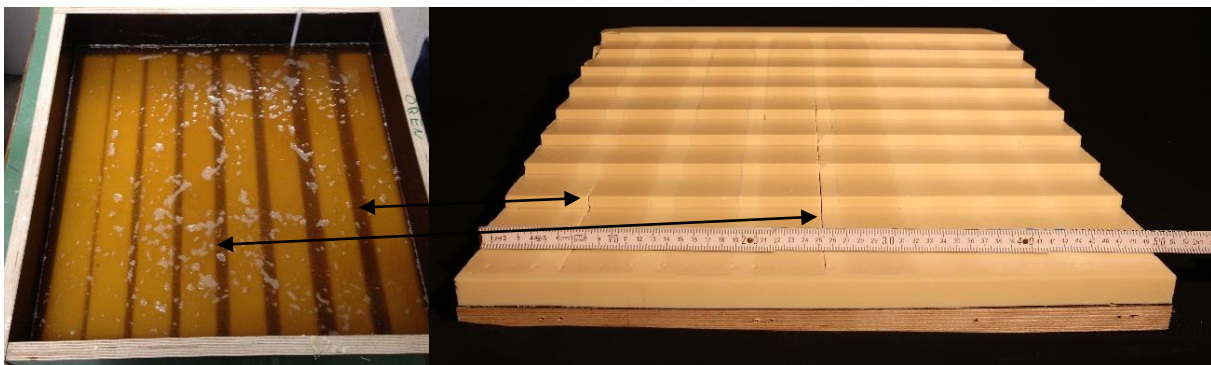


Abbildung 4-10: Mit heißem CFW Wachs vergossene gehobelte CFW Wachstafeln mit einer Dicke von 45 mm und unterschiedlichen Abständen zueinander (links), am stufenförmig abgefrästen Wachsblock mit den Abmessungen 500 x 500 mm und einer Höhe von 120 mm sind Risse bei mittleren und großen Fugenabständen zwischen den vergossenen gehobelten CFW Wachstafeln erkennbar (rechts)



Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden alle im Folgenden hergestellten Wachsböcke durch Verguss von gehobelten CFW Wachstafeln mit einer Dicke von 45 mm und einer Vergussfugenbreite von 5 mm hergestellt. Wie in Abbildung 4-11, links dargestellt, wird dabei die exakte Vergussfugenbreite und Positionierung der Wachstafeln beim Verguss durch eine aufgesteckte Zahnleiste sichergestellt, die nach einem ersten Erstarren des Wachses wieder entnommen wird. In die Boden- bzw. Trägerplatte der Form sind zwei baugleiche Zahnleisten eingelassen.



Abbildung 4-11: Verguss der gehobelten Wachstafeln mit einer Dicke von 45 mm und einem exakten Fugenabstand von 5 mm mit 90°C heißem CFW (links), Überprüfung der Temperatur (Mitte), nach dem Abkühlen des CFW Wachses ausgeschalteter Wachsblock mit den Abmessungen 500 x 500 mm und einer Höhe von 150 mm (links)

Die so erstellten Wachsböcke zeigen bei einer stichprobenhaften Überprüfung durch stufenförmiges Abfräsen in den inneren Vergussfugen keinerlei Risse (Abbildung 4-12, links) und einen stoffschlüssigen Verbund mit den Wachstafeln. Um diesen Verbund zu überprüfen, wurde ein 50 mm breiter Barren aus einem so hergestellten Wachsblock quer zu den Vergussfugen herausgesägt und im Vergleich zu einer gegossenen Wachstafel mit gleichen Abmessungen in einer Drei-Punkt-Biegezugprüfung bis zum Bruch belastet (Abbildung 4-12, links). Der vergossene Barren zeigte dabei eine gleich hohe Tragfähigkeit wie die Wachstafel und das Bruchbild zeigt, dass der entstandene Riss nicht durch die Vergussfuge, sondern durch das Vollmaterial ging.

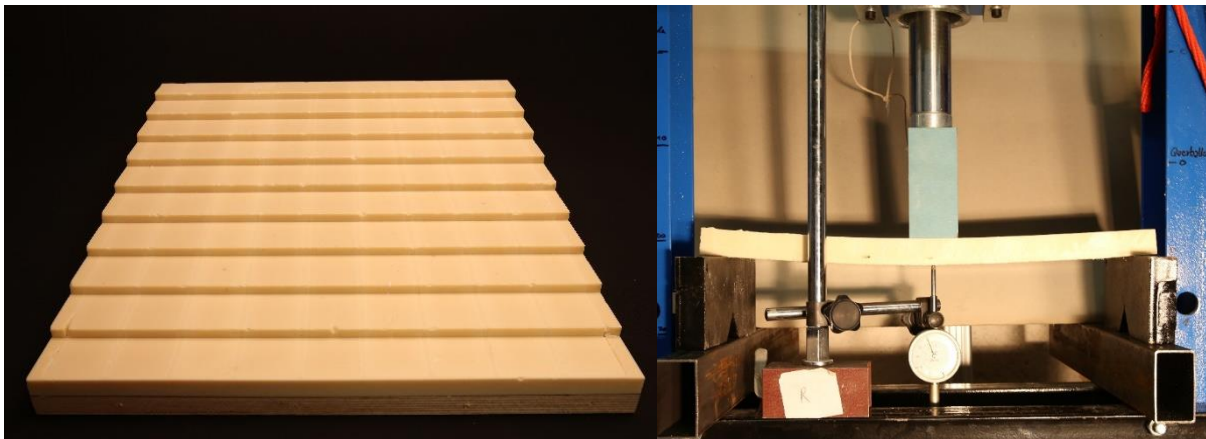


Abbildung 4-12: Am stufenförmig abgefrästen Wachsblock mit den Abmessungen 500 x 500 mm, einer Höhe von 120 mm und einer Vergussfugenbreite von 5 mm sind nur Risse an den Außenseiten der äußeren vergossenen, gehobelten CFW Wachstafeln erkennbar (links), Wachsprobekörper, welcher quer zu den Vergussfugen aus einem Wachsblock herausgesägt wurde: Biegebelastung zur Überprüfung des Verbundverhaltens an den Vergussfugen

Obwohl mit diesem Verfahren in technischer Hinsicht höchstwahrscheinlich nahezu unbegrenzt große Wachsböcke hergestellt werden können, zeigte sich bei der Herstellung des Wachsblocks für das Anwendungsbeispiel des Beton-Fertigteils balkons (vergl. 4.5.1) mit den Abmessungen 1150 x 705 x 150 mm, dass dieses Herstellungsverfahren relativ zeitaufwendig ist. Zur Optimierung des Verfahrens wurde daher versucht, anstelle der 50 mm dicken 100 mm dicke Wachstafeln zu gießen. Leider zeigte sich bei der Überprüfung der 100 mm dicken Wachstafeln durch Aufsägen, dass diese im Kern über die gesamte Höhe einen Riss aufwiesen (Abbildung 4-13, links) und sich daher für das Vergießen nicht eignen. Es sollte also eine Dicke von 50 mm beibehalten werden. Für eine effizientere

Herstellung könnten die Wachstafeln mit einer industriellen Wachstafelgießmaschine (Abbildung 4-13, rechts), wie bei der Firma Tromm vorhanden, gegossen und anschließend in einer automatisierten Bearbeitungsstraße zugeschnitten und gehobelt werden. Die einzelnen Wachstafeln könnten anschließend automatisiert zu größeren Verbünden vergossen werden, welche schlussendlich zur endgültigen Blockgröße vergossen werden. Neben dem Verguss von Wachstafeln sollte in weiterführenden Versuchen untersucht werden, inwieweit es möglich ist, Wachstafeln durch Erwärmen der Oberflächen, z. B. durch einen Heizstrahler oder eine heiße Stahlplatte, und anschließendes Zusammenpressen zu größeren stoffschlüssigen Wachsböcken zu verschweißen.



Abbildung 4-13: In einer gekühlten Stahlschale gegossene und anschließend aufgesägte CFW Wachstafeln mit einer Dicke von 100 mm und deutlich zu erkennender Rissbildung im Kern über die gesamte Höhe (links), industrielle Wachstafelgießmaschine bei der Firma Tromm (rechts)

##### 4.1.1.6 Pressen von Wachsspänen

Ein weiterer Ansatz zur Herstellung von Wachsböcken ist das bei der industriellen Kerzenherstellung angewendete Strangpressverfahren von kalten Wachsspänen unter hohem Druck (Abbildung 4-14).



Abbildung 4-14: Strangpressmaschine zur Herstellung von Altarkernen  $\varnothing = 100$  mm aus feinen Wachsspänen in einer Kerzenfabrik

Gegenüber dem Gießen von geschmolzenem Wachs bestehen bei diesem Ansatz zum Pressen von Wachsböcken die folgenden wesentlichen Vor- und Nachteile:

##### Vorteile:

- schnelle Herstellung, da geringer Zeitaufwand
- Energiebedarf beim Pressen gegenüber dem Einschmelzen deutlich geringer
- durch Kaltverformen des Wachses keine thermische Volumenminderung

##### Nachteile:

- geringere Druckfestigkeit, da geringere Bindungskräfte im Wachsgefüge
- hoher Investitionsaufwand in Maschinen, z. B. Pressen und Formen
- innere Spannungen bei großen Blöcken noch ungeklärt
- komplexeres Recycling, da mechanische Verunreinigungen wie z. B. Betonreste nicht einfach aus dem flüssigen Wachs herausgefiltert werden können



Da beim Vergleich der Vor- und Nachteile dieser Ansatz zwar vielversprechend für eine rationelle industrielle Herstellung von Wachsböcken und somit Wachsschalungen ist, aber eines hohen Investitionsaufwands in u. a. große Maschinen bedarf, wurde dieser Ansatz im Rahmen des DFG geförderten Grundlagenforschungsprojektes nicht weiterverfolgt.

Für das derzeit am ITE gemeinsam mit dem Industriepartner B+S Engineering aus Rheine [143] durchgeführte Forschungsprojekt als Weiterentwicklung der Grundlagenforschungen zur Non-Waste-Wachsschalungstechnologie stellt das Pressen von Wachsböcken hingegen einen wesentlichen Bestandteil dar. In dem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projekt soll ein modulares und vollautomatisches Produktionsverfahren für Freiformbetonschalungen im Hochbau auf Basis von technischem Wachs erforscht und möglichst wirtschaftlich eingesetzt werden können. In Analogie zum Verfahren zur Herstellung von Schalungen für monolithische Abwasser-Schachtunterteile aus EPS PS40 (vergl. 2.3.3), bei welchem theoretisch auch Wachs als Ersatz eingesetzt werden könnte, sind die Anforderungen an die erreichbare Präzision und absolute Formstabilität der Schalung geringer, sodass auch die geringere Druckfestigkeit des Wachses zugunsten von Zeit und Energieeinsparung in Kauf genommen werden kann.

Ein erster in Kooperation von ITE und B+S durchgeführter Großpressversuch (Abbildung 4-15) hat gezeigt, dass die Prinzipien aus der industriellen Kerzenherstellung auch auf die Herstellung von großformatigen Wachsböcken mit einem Durchmesser von 1 m übertragen werden können. Durch eine Optimierung der Presskraft im Verhältnis zur Temperatur der gepressten Späne konnten beim eingesetzten CFW Wachs dadurch bereits 60 % der Druckfestigkeit von gegossenem Material erreicht werden.



Abbildung 4-15: Großpressversuch zum Pressen von Wachsböcken aus feinen CFW Wachsspänen (links), Einfüllen der Wachsspäne in die Pressform (oben), gepresster Wachsböck  $\varnothing = 1\text{ m}$ , Höhe 50 cm (unten)



### 4.1.2 Schalungstechnische Randbedingungen

#### 4.1.2.1 Verbindungs- und Verankerungsmittel im Wachs

Verbindungsmittel werden dafür benötigt, um u. a. das Wachs bzw. die Wachsschalungen z. B. auf Trägerplatten zu verankern oder mit Systemschalungen zu kombinieren. Zudem können sie ggf. notwendig sein, um einzelne Wachsschalungen untereinander zu verbinden. In begleitenden Versuchen wurde daher untersucht, inwieweit sich verschiedene Verbindungsmittel (z. B. Schrauben) in Bezug auf Wachs eignen und welche Zugtragfähigkeit (Auszugswiderstand) mit ihnen erreicht werden kann. Die am Wachs CFW durchgeführten Versuche sind in Anhang G detailliert dargestellt. Getestet wurden unterschiedliche Rampa-Muffen als Einschraubmutter mit metrischem Innengewinde und Holzaußengewinde des Typs SKL, Holzschrauben und Schrauben mit metrischem ISO-Gewinde. Um lokale Abplatzungen bzw. ein Aufreißen des Wachses zu vermeiden, hat es sich als notwendig herausgestellt, die Schrauben in entsprechend vorgebohrte Löcher einzudrehen.

Als Ergebnis wurde festgestellt, dass sich Schrauben mit metrischem ISO-Gewinde nicht zur Verankerung im Wachs eignen, da sie sich trotz Vorbohren aufgrund ihres feinen Gewindes nicht in das Wachs eindrehen lassen. Holzschrauben und Rampa-Muffen mit großem Außendurchmesser, kleinem Schaftdurchmesser und hoher Gewindesteigung ließen sich in vorgebohrte Löcher hingegen äußerst gut eindrehen und erreichten bei einer Einschraublänge von 30 mm eine für Wachsschalungen als ausreichend anzusehende Zugtragfähigkeit. Z. B. erreichte die getestete Rampa-Muffe mit einem Außen- $\varnothing$   $D = 18,5$  mm und mit Innengewinde ISO M10 (Abbildung 4-16, links) eine Zugtragfähigkeit von 2,4 kN (Mittelwert aus drei Versuchen) und die getestete Holzbauschraube Außendurchmesser  $D = 8,0$  mm (Abbildung 4-16, rechts) eine Zugtragfähigkeit von 1,9 kN (was in etwa 80 % der rechnerischen charakteristischen Zugtragfähigkeit [144] der baugleichen Holzbauschraube (2,35 kN) in einem Nadelholz C24 entspricht).

Da diese Versuche lediglich als vereinfachte Tastversuche angesehen werden sollten, wird für weiterführende Untersuchungen empfohlen, zusätzlich zu den untersuchten Verbindungsmitteln eine weitere Auswahl aus dem Holzbau an einer genormten Zugprüfmaschine mit langsamen Prüfgeschwindigkeiten oder unter Dauerbelastung zu prüfen.

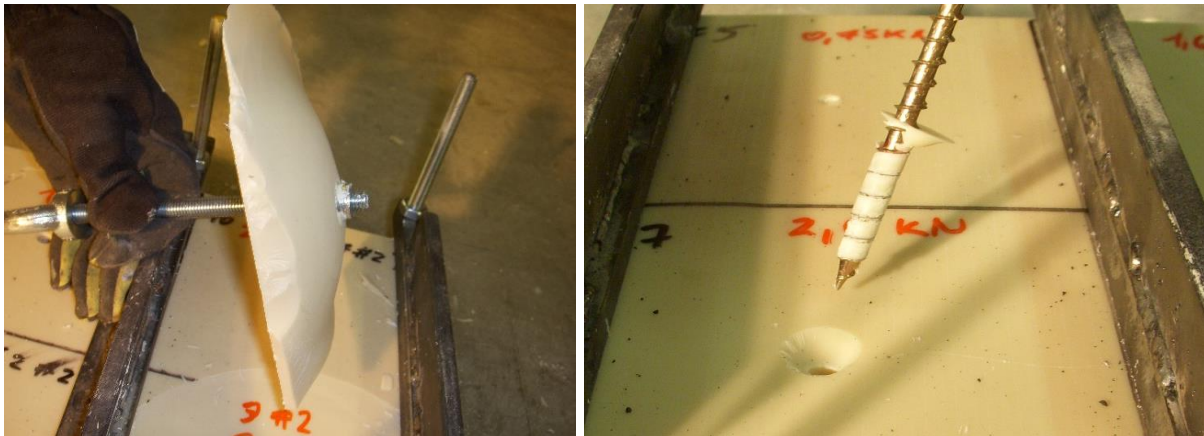


Abbildung 4-16: Zugversagen des Wachses (schüsselartiger Ausbruchkegel) bei der Rampa-Muffe mit einem Außendurchmesser  $D = 18,5$  mm bei einer Zugkraft von 2,4 kN (links), Schubversagen (Abscheren der Wachssflanken) und kleiner Ausbruchkegel bei der Holzbauschraube mit einem Außendurchmesser  $D = 8,0$  mm bei einer Zugkraft von 1,9 kN (rechts)

#### 4.1.2.2 Ausschalhilfen zur Trennung von Wachsschalung und Betonbauteil

Der Begriff „Ausschalen“ wird vornehmlich im Betonbau verwendet und bezeichnet das Entschalen oder auch Entformen, also die Trennung der Schalung vom gegossenen und erhärteten Bauteil nach der Ausschalfrist. Nach [141] resultiert die Haftung zwischen Beton und Schalung auf der Zementhydratation. Einerseits entsteht durch die Hydratbildung eine physikalische Bindung oder Haftreibung und andererseits, durch den verursachten Wasserverbrauch, eine kapillare Saugwirkung bzw. Adhäsionskraft, da die Summe der Anfangsvolumina von Wasser und Zement größer sind als das

Volumen der gebildeten Hydrate (u. a. „Le Chatelier“ Kontraktion genannt). Bei konventionellen ebenen Betonbauteilen wie z. B. Decken und Wänden ist das Ausschalen aufgrund der einfachen Geometrie und dem Einsatz von geeigneten Trennmitteln wie z. B. Schalölen relativ einfach, da hier kaum Haftreibungskräfte dem Ablösen entgegenwirken und die Adhäsionskräfte durch eine einfache Luftströmung entlang der ebenen Flächen schnell abgebaut werden. Zum Ausschalen selbst wird dabei entweder die Tragkonstruktion der Schalung abgesenkt und es löst sich die Schalung durch ihr Eigengewicht vom Beton oder es werden sogenannte Ausschalhebel (Ähnlichkeit mit Brechstangen) zum Lösen verwendet. Die einzige bekannte kommerzielle Ausschalhilfe, welche das Abdrücken von Rahmenschaltafeln vom Beton über eine Gewindespindel mit Kurbel ermöglichen soll, ist die der Firma Schaltec Typ TRITON [145].

Bei komplexeren Geometrien mit starken Krümmungen und geringen Entschalwinkeln nehmen die Haftreibungs- und Adhäsionskräfte zu, sodass zum Lösen der Schalung vom Betonteil effizientere Ausschalhilfen in Analogie zu Auswerfern bei Spritzgussformen im Kunststoff-Spritzguss eingesetzt werden müssen. Hier bestätigt sich die (Faust-)Regel aus [13]: „beim Einschalen ans Ausschalen denken“.

Wie im FreeFab Verfahren von Gardiner (vergl. 2.4.3.4 und 2.5.4) praktiziert, können auch mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie hergestellte Bauteilgeometrien mit z. B. Hinterschneidungen durch das Abschmelzen der Wachsschalung thermisch ausgeschalt werden. Zwar ist dieses relativ einfach z. B. mit einem Ofen durchzuführen, birgt aber die Nachteile, dass die Schalungen z. B. für Kleinserien nicht wiederverwendet werden können und zudem eine dünne Wachsschicht auf der Oberfläche des Betons verbleibt, die ggf. durch nachträgliches Reinigen mit Lösungsmitteln oder heißem Wasserdampf wieder aufwendig entfernt werden muss.

Bei formstabilen oder formerhaltenden Geometrien, wie diese z. B. bei der Herstellung von großformatigen, geometrisch komplexen UHPC Maschinengestellen in Fertigteilbauweise zu finden sind, werden z. B. zum Ablösen des Bauteils aus der Schalung ausfahrbare Hydraulikstempel eingesetzt (Abbildung 4-17).



Abbildung 4-17: Beispiel einer Ausschalhilfe zum Lösen geometrisch komplexer UHPC Maschinengestelle aus ihrer Stahlchalung: eingefahrener Stahlstempel (Auswerfer), der das erhärtete UHPC Bauteil von der Schalung abdrücken kann (links), manueller hydraulischer Wagenheber unter der Schalung zum Betrieb des Stahlstempels (rechts)

Da sich Wachsschalungen aufgrund der meist starken Krümmungen und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Wachsdicken nicht für den Einsatz von Hydraulikstempeln eignen, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes nach alternativen Ansätzen für Ausschalhilfen gesucht. Basierend auf der Möglichkeit, bereits im CAD Entwurf Vorkehrungen für Ausschalhilfen in die Wachsschalungen zu integrieren, welche dann im CNC Fräsprozess ohne großen Zusatzaufwand mitgefertigt werden, wurde der folgende Ansatz für eine praktikable Ausschalhilfe entwickelt:

Wie in Abbildung 4-18, links dargestellt, wird eine zylindrische Aussparung in die Oberfläche der Wachsschalung integriert, die vor dem Einfüllen des Betons mit einer gleich großen Metallrunde (aus Kostengründen wurde eine 2-Cent-Münze verwendet) verschlossen wird (Abbildung 4-18, rechts). In der Mitte der Aussparung wird im Folgenden ein senkrechtes Loch mit einem Durchmesser  $d = 12 \text{ mm}$  durch die komplette Schalung gebohrt. Auf der Rückseite der Schalungen wird dieses Loch auf den

letzten 30 mm auf  $\varnothing$  16,5 mm ausgeweitet. In die Aufweitung wird eine Rampa-Muffe Außendurchmesser D = 18,5 mm / Innengewinde ISO M10 eingedreht.

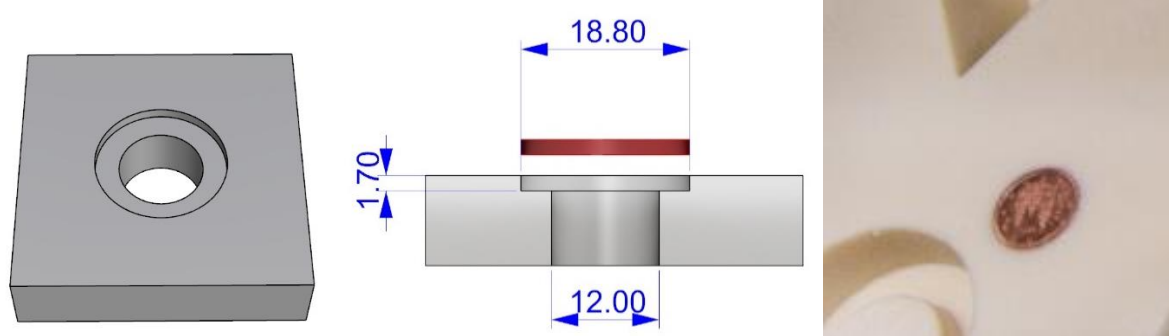


Abbildung 4-18: Geometrie der Aussparung für die entwickelte Ausschalhilfe, welche in die Wachsschalung eingefräst und mit einer Metallrunde abgedeckt wird: Perspektive (links), Schnitt mit Maßen [mm] (Mitte), Anwendungsbeispiel in einer Wachsschalung, bei welcher die Aussparung mit einer Metallrunde in Form einer 2-Cent-Münze verschlossen wurde (rechts)

Nach dem Einfüllen und Aushärten des Betons wird im ersten Schritt zum Ausschalen an die Rampa-Muffe(n) auf der Rückseite der Wachsschalungen ein Schlauch angeschlossen, durch den zuerst Wasser und anschließend Luft mit einem Druck von 10 Bar gepresst wird (Abbildung 4-19, links). Die als Ventil fungierende Metallrunde wird dadurch leicht angehoben und ermöglicht es dem eingepressten Wasser, in die Grenzschicht zwischen Wachsschalung und Beton bis zum Austritt an den freien Schalungsrändern zu strömen. Die im Nachfolgenden eingepresste Luft drückt das Wasser aus der Grenzschicht, löst die Adhäsionskräfte und erzeugt Luftkanäle, wodurch Luft beim Anheben des Betons in die Grenzschicht nachströmen kann. Im zweiten Schritt wird anstelle des Schlauches eine lange M10 Maschinenschraube durch die Rampa-Muffe gedreht, welche gegen die Metallrunde drückt und so den Beton von der Wachsschalung abdrückt (Abbildung 4-19, rechts) und die Haftreibungskräfte überwindet. Besonders bei komplexen Geometrien kann durch die Anordnung mehrerer solcher Ausschalhilfen ein planparalleles Abdrücken des Betonbauteils von der Schalung ohne Verkanten erreicht werden. Wie die Begleitversuche gezeigt haben (vergl. 4.1.1), erreicht die hier verwendete Rampa-Muffe im CFW eine Auszugswiderstandskraft von 2,4 kN und kann so bei entsprechender Anordnung die notwendigen Kräfte aufnehmen.



Abbildung 4-19: Wachsschalung, in die im ersten Schritt Wasser und Druckluft in die Trennschicht Wachs / UHPC über die Ausschalhilfe über rückwärtig eingeschraubte Rampa-Muffen Außen- $\varnothing$  D = 18,5 mm eingepresst wird (links), im zweiten Schritt werden M10 Maschinenschrauben in die Rampa-Muffen eingedreht und das UHPC Bauteil wird von der Wachsschalung abgedrückt (rechts)

Das entwickelte Prinzip dieser Ausschalhilfe wurde im Nachfolgenden u. a. bei der Fertigung der Außen-Wachsschalungen (Block B und C – vergl. 4.3) und den Anwendungsbeispielen (vergl. 4.5) erfolgreich im Zusammenspiel mit dem verwendeten Trennmittel (Schalwachs: Typ GRACE Ciri LM-33) eingesetzt. Selbst die mit geringen Entformungswinkeln von nur 2° versehenen und stark strukturierten UHPC-Abgüsse konnten nach dem Einpressen von Wasser und Druckluft durch händisches Eindrehen der Maschinenschrauben einfach und ohne jegliche Absplitterungen von der Wachsschalung getrennt werden.

## 4.2 Einfluss der Wachsspezifikationen auf die Zerspanbarkeit

In den am IWF durchgeführten Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss der Wachsspezifikationen auf die Zerspanbarkeit wurden die beiden ausgewählten Industriewachse PW 3146 und CFW hinsichtlich ihrer Zerspanbarkeit an einem 3-Achs- und einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum an Wachsböcken (Abmessungen 300 mm x 300 mm x 80 mm) mit verschiedenen Frässtrategien, Werkzeugen (Fräsern) und unter Variierung der Prozess- und Bearbeitungsparameter untersucht.

Die Grundlagenuntersuchungen, welche bereits in [146] auszugsweise beschrieben wurden, gliedern sich dabei in Abhängigkeit der Frässtrategien in drei maßgebende Prozessschritte:

1. Planfräsen bzw. Schruppen, wobei möglichst große Fräser zur Fertigung planarer Oberflächen bei einem größtmöglichen Zeitspanvolumen verwendet werden.
2. Schaftfräsen, bei welchem zylinderförmige Schaftfräser zur Fertigung von Konturen und einfacher Nutgeometrien mit und ohne Entformungswinkel, mit scharfen Kanten und hoher Oberflächenqualität verwendet werden.
3. Freiformfräsen, bei welchem Vollradiusfräser zur Fertigung von gering bis stark gekrümmten Freiformen mit hoher Oberflächenqualität verwendet werden.

Neben dem funktionalen Zusammenhang zwischen den Bearbeitungsparametern (Tabelle 17), der Rauheit (Oberflächenqualität) der entstehenden Wachsfläche und des damit erstellten späteren Betonabgusses stellen die Entformbarkeit sowie der jeweilige Werkzeugverschleiß, die Zusetzungen am Werkzeug, der Einfluss der Schneidstoffe und der Einfluss der Kühlschmierbedingungen (trocken, Druckluft, polymere Lösung) einen wesentlichen Untersuchungsschwerpunkt dar.

Tabelle 17: Definition der relevanten Bearbeitungsparameter beim Fräsen mit bestimmten Schneiden

Parameter	Einheit	Definition
Zustellung $a_p$	[mm]	Gewählte Schnitttiefe, die das Werkzeug im Material vertikal eingreift
Eingriff $a_e$	[mm]	Gewählte Schnittbreite, die das Werkzeug im Material horizontal eingreift
Schnittgeschwindigkeit $v_c$	[m/min]	Gewählte Geschwindigkeit, mit der eine Schneide des Fräasers in Schnittrichtung durch das zu bearbeitende Material geführt wird. Im Allgemeinen ein Tabellenwert in Abhängigkeit vom Schneidstoff und dem zu bearbeitenden Material. Prinzipiell gilt: je höher die Schnittgeschwindigkeit, desto glatter wird die Oberfläche, desto höher auch der Verschleiß am Fräser und dessen Temperatur beim Fräsen.
Vorschub je Schneide $f_z$	[mm]	Gewähltes Maß für die Eindringtiefe (Vorschub) einer Schneide des Fräasers ins Material je Umdrehung. Allgemein ein Tabellenwert in Abhängigkeit vom Schneidstoff und dem zu bearbeitenden Material, beeinflusst die Spangröße.
Drehzahl $n$	[1/min]	Umdrehungen des Fräasers je Minute, berechnet sich aus $v_c$ und dem Durchmesser $d$ des Fräasers: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d}$ (1a)
Vorschubgeschwindigkeit $v_f$	[mm/min]	Geschwindigkeit, mit der sich der Fräser senkrecht zu seiner Rotationsachse durch das zu bearbeitende Material bewegt, berechnet sich aus $f_z$ , $n$ und Anzahl der Schneiden $z$ : $v_f = n \cdot f_z \cdot z$ (2a)
Zeitspanvolumen $Q$	[cm <sup>3</sup> /min]	Das in Form von Spänen in einer bestimmten Zeit abgetragene Volumen an Material berechnet sich: $Q = a_e \cdot a_p \cdot v_f$ (3a)



### 4.2.1 Planfräsen

Im Rahmen der am IWF durchgeführten Versuchsreihen zum Planfräsen wurden zwei verschiedene Messerkopf- ( $\varnothing = 100$  mm, Anzahl Schneiden  $z = 8$  und  $\varnothing = 90$  mm,  $z = 2$ ) und ein Walzenstirnfräser ( $\varnothing = 50$  mm,  $z = 3$ ), wie in Abbildung 4-20 beispielhaft dargestellt, verwendet. Bei den Versuchen wurden dabei die Vorschubgeschwindigkeiten  $v_f$  und die Zustellungen  $a_p$  variiert. Die Schnittgeschwindigkeiten  $v_c$  blieben innerhalb der Versuchsreihen konstant. Der Eingriff  $a_e$  (Schnittbreite) entsprach jeweils dem halben Fräskopfdurchmesser.



Abbildung 4-20: Werkzeugauswahl für die Versuchsreihen zum Planfräsen: Beispiel für Walzenstirnfräser (links), Stahlbearbeitungs-Messerkopffräser  $\varnothing = 100$  mm (Mitte) und Holzbearbeitungs-Messerkopffräser  $\varnothing = 90$  mm (rechts)

Die Untersuchungen am IWF lieferten dabei folgende Erkenntnisse:

- PW 3146 und CFW ließen sich bei moderaten Vorschubgeschwindigkeiten mit den ausgewählten Fräswerkzeugen gut bearbeiten, und es konnten relativ glatte Oberflächen mit geringen Rauheiten gefertigt werden.
- Höhere Vorschubgeschwindigkeiten (daraus resultierendes hohes Zeitspanvolumen) führten bei dem Messerkopffräser zu sichtbar schlechteren und rauerer Oberflächen, zudem nahmen die Kantenausbrüche deutlich zu, und es kam zu partiellen Aufschmelzungen der Wachse.
- Der Walzenstirnfräser führte hingegen bei den untersuchten, moderaten Vorschubgeschwindigkeiten und vergleichsweise hohen Zustellungen (daraus resultierendes hohes Zeitspanvolumen) zu sehr guten, visuell glatten Oberflächen.
- Die trockene Zerspanung des Wachses PW 3416 führte zu einer starken Staubentwicklung.
- Gegenüber der Trockenbearbeitung führte der Einsatz von Druckluft oder polymerer (Kühlschmier-)Lösung als Kühlmedium zu vergleichbaren Oberflächen hinsichtlich des visuellen Eindrucks, was auch anhand der gemessenen Oberflächenrauheiten bestätigt wurde.
- Die Bearbeitung der Wachse ohne Kühlschmierstoff oder Druckluft führte zu Anhaftungen von Wachs an der Schneide und zu Zusetzungen der Kühlkanäle des Werkzeugs. Zusetzen der Werkzeuge und Anhaftungen konnten größtenteils vermieden werden, wenn Druckluft oder polymere (Kühlschmier-)Lösung eingesetzt wurden, da die Späne sofort von der Zerspanstelle wegtransportiert wurden.
- Bei der Bearbeitung des homogenen Wachses CFW wurde über alle Versuche und Fräser und bei PW 3416 mit den Schneidstoffen Hartmetall beschichtet und unbeschichtet (Messerkopffräser) kein Verschleiß an den Schneiden detektiert. Bei der Bearbeitung von PW 3416 mit dem Schneidstoff HSS Co5 (Walzenstirnfräser) trat dagegen bereits nach einem sehr kleinen Zerspanvolumen ein deutlicher Verschleiß der Schneiden auf, was sich ggf. auf den enthaltenen Füllstoff Terephthalsäure zurückführen lässt.

#### 4.2.2 Schaftfräsen

Im Rahmen der am IWF durchgeführten Versuchsreihen zum Schaftfräsen wurden Schaftfräser (Durchmesser  $d = 16 \text{ mm}$ ,  $z = 2$ ) aus Hartmetall mit und ohne einer zusätzlichen DLC-Beschichtung<sup>16</sup> (Abbildung 4-20, rechts) verwendet, um Nuten ohne und mit Entformungswinkeln von  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$  und  $4^\circ$  in jeweils zwei verschiedenen Tiefen von  $10 \text{ mm}$  und  $20 \text{ mm}$  in beiden untersuchten Wachsen zu fertigen (Abbildung 4-21, oben links). An den Nuten sollte dabei u. a. die Maß- und Formgenauigkeit und die Rauheit untersucht werden.

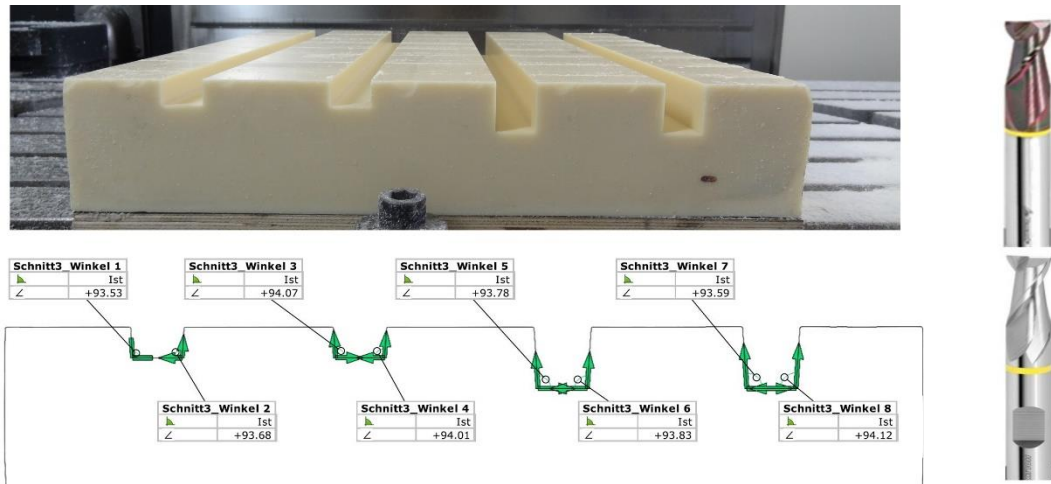


Abbildung 4-21: Gefertigte Nuten mit dem Entformungswinkel  $4^\circ$  (oben links), digitale Vermessung der gefertigten Nuten mit GOM Inspect (unten links), verwendete Schaftfräser Durchmesser  $d = 16 \text{ mm}$  mit (oben rechts) und ohne DLC Beschichtung (unten rechts) © IWF

Die Untersuchungen zur Fertigung der Nuten am IWF lieferten dabei folgende Erkenntnisse:

- Bei konstanter Schnittgeschwindigkeit führte die Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit zu einer Zunahme der Rauheit in den Nuten.
- Die Werkstoffanhaftungen nahmen unter Nutzung von Druckluft als Kühlmedium stark und unter polymerer Lösung noch stärker ab.
- Es wurde kein Werkzeugverschleiß festgestellt.
- Ein Einfluss der DLC-Beschichtung konnte nicht festgestellt werden.
- Durch die Maß- und Formanalyse (beispielhaft Abbildung 4-21, unten links) konnte eine hohe Präzision aller gefertigten Entformungswinkel sowie der Nuttiefen nachgewiesen werden.

Im Folgenden wurden die im CFW Wachs gefertigten Nuten mit Entformungswinkeln von  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$  und  $4^\circ$  am ITE dazu verwendet, durch Zugversuche den Einfluss des Entformungswinkels auf die notwendige Kraft zum Ablösen des Betons von der Wachsschalung zu bestimmen. Hierzu wurden die Nutenschalungen mit einer dünnen Schicht Trennmittel (Schalwachs: Typ GRACE Ciri LM-33) eingestrichen und mit UHPC ND-2,5 (Typ Dyckerhoff Nanodur, gemäß Tabelle 5) abgegossen. Nach dem Abbinden des UHPC wurden die Schalungen über Joche am Boden verankert und an den UHPC Abguss über einen Kettenzug eine Zugkraft aufgebracht. Bei den im Folgenden je Entformungswinkel und Nutentiefe jeweils zweifach durchgeführten Zugversuchen wurde die Kraft jeweils bis zum Ablösen des UHPC von der Schalung erhöht und mittels einer Waage gemessen.

Die gemessenen Ergebnisse zeigen, dass sich zwar alle UHPC Probekörper ohne eine Schädigung bzw. Verformung des Wachses auf diese Weise ablösen lassen, aber kein Zusammenhang zwischen Entformungswinkeln / Nutentiefe und gemessener Zugkraft erkennbar ist. Dieses lässt sich ggf. darauf zurückführen, dass die maßgebende zu überwindende Kraft zum Ablösen in diesem gewählten Versuchsaufbau nicht die winkel- und rauehtsabhängigen Haftreibungskräfte an den Nutenflanken, sondern die in der Trennschicht zwischen Wachs und UHPC wirkenden Adhäsionskräfte sind. Da die

<sup>16</sup> DLC: amorphe Kohlenstoffschicht



Adhäsionskräfte stark vom Lufteintrag in die Trennschicht abhängig sind und dieser beim gewählten Versuchsaufbau nicht kontrollierbar ist, könnte dieses zu den stark schwankenden und nicht reproduzierbaren Ergebnissen geführt haben. Dennoch kann hieraus Folgendes abgeleitet werden:

- Entformungswinkel sind für das Erhalten der Formtreue der Schalung beim Ausschalen notwendig.
- Das Einpressen von Flüssigkeit, gefolgt von Luft in die Trennschicht könnte die wirkenden Adhäsionskräfte deutlich verringern und so das Entschalen komplexer Geometrien deutlich erleichtern.

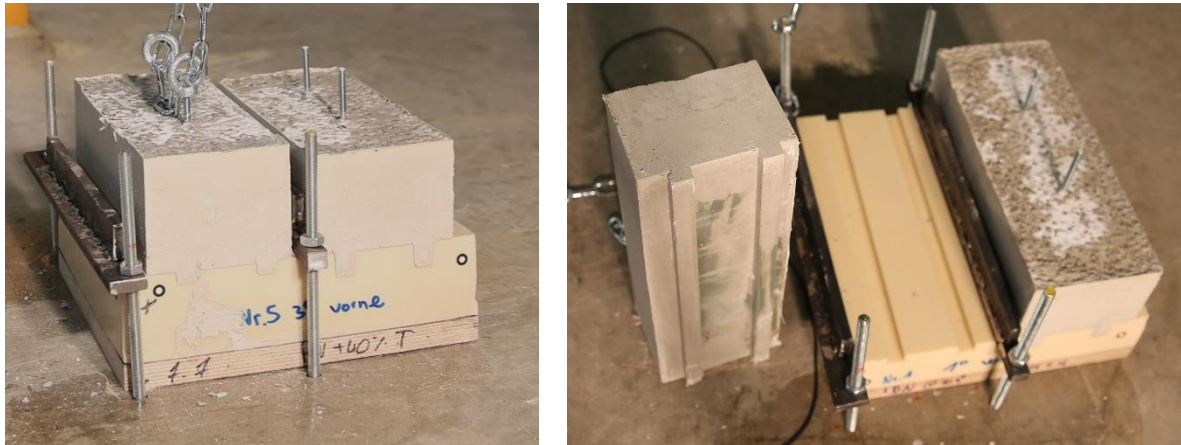


Abbildung 4-22: Auf einer Wachsschalung mit Nuten mit Entformungswinkel gegossener UHPC Probekörper vor Zugversuch (links), nach Zugversuch (rechts)

### 4.2.3 Freiformfräsen

In der CNC Zerspaltung werden gekrümmte freigeformte Flächen i. d. R. durch sogenanntes Abzeilen (paralleles Abfahren) der Fläche mit einem Vollradiusfräser in einem Näherungsverfahren hergestellt. Da solche Freiformflächen mit Krümmungsradien in der Architektur eine hohe Relevanz besitzen (vergl. 2.2.4), wurde im Rahmen der am IWF durchgeführten Versuchsreihen zum Freiformfräsen untersucht, wie sich der Fräsbahnabstand (paralleler Abstand der Fräsbahnen) im Bezug zum eingesetzten Durchmesser des Vollradiusfräasers auf die resultierende Oberflächenstruktur der Wachsschalung bzw. auf die Oberfläche des späteren Betonabgusses auswirkt. Besonders stand dabei im Fokus, ab welchem Fräsbahnabstand die entstehenden Rillen auf der Wachs Oberfläche durch das verwendete Schalwachs (Trennmittel) ausgeglichen werden, um so eine, wie in der Architektur oftmals gewünscht, optisch bzw. haptisch glatte Oberfläche im Betonabguss zu erreichen. Da die Bearbeitungszeit je Fläche proportional zur Verringerung des Fräsbahnabstandes zunimmt, ist dieses ein relevanter Faktor für die Fräsdauer und somit für die Wirtschaftlichkeit der Herstellung solcher Flächen.

Hierzu wurden Wachsschalungen aus CFW und PW 3146 (Abbildung 4-23) mit einachsig gekrümmten Flächen durch Abzeilen hergestellt, bei denen der Fräsbahnabstand ( $x = 1 \text{ mm}$ ,  $x = 0,5 \text{ mm}$  und  $x = 0,1 \text{ mm}$ ) im Bezug zu den beiden eingesetzten Vollradiusfräsern ( $\varnothing = 20 \text{ mm}$  und  $\varnothing = 10 \text{ mm}$ ) variiert wurde. Die weißen Verfärbungen auf den dargestellten Schalungen resultieren dabei aus dem nach dem Ausschalen für den 3D-Scan aufgetragenen Kontrastmittel. Nach der Herstellung wurden die Wachsschalungen mit kunststoffbeschichteten Furniersperrholzplatten eingefasst, mit Silikon abgedichtet, mit einer dünnen Schicht Trennmittel (Schalwachs: Typ GRACE Ciri LM-33) eingestrichen und mit UHPC ND-2,5 (Typ Dyckerhoff Nanodur, gemäß Tabelle 5) ausgegossen.

Wie in Abbildung 4-24, links beispielhaft dargestellt, zeigen die UHPC Abgüsse der Schalungen aus CFW gute detailgetreue Oberflächenqualitäten. Aufgrund des hohen Feinkorngehaltes des UHPC entstehen dabei sehr präzise Abgüsse der Oberfläche, auf denen deutlich die aus den verschiedenen Fräsbahnabständen resultierenden Rillen zu erkennen sind.

Alle UHPC Abgüsse der Schalungen aus PW 3146, wie in Abbildung 4-24, rechts beispielhaft dargestellt, zeigten dagegen einen starken weißen Schleier und relativ raue Oberflächen im mittleren ebenen Referenzbereich. Da vermutet wird, dass der im Wachs PW 3146 enthaltene Füllstoff Terephthalsäure (pH-Wert 3,88) zu einem Ansäuern der UHPC Oberfläche beim Abbinden und somit zu schlechten Oberflächeneigenschaften führt, wurde in einem weiteren Versuch das Wachs CFW ebenfalls mit 40 % Terephthalsäure versetzt und mit UHPC abgegossen. Auch hier zeigten sich bei den UHPC Abgüssen weiße Schleier und eine relativ raue Oberfläche.

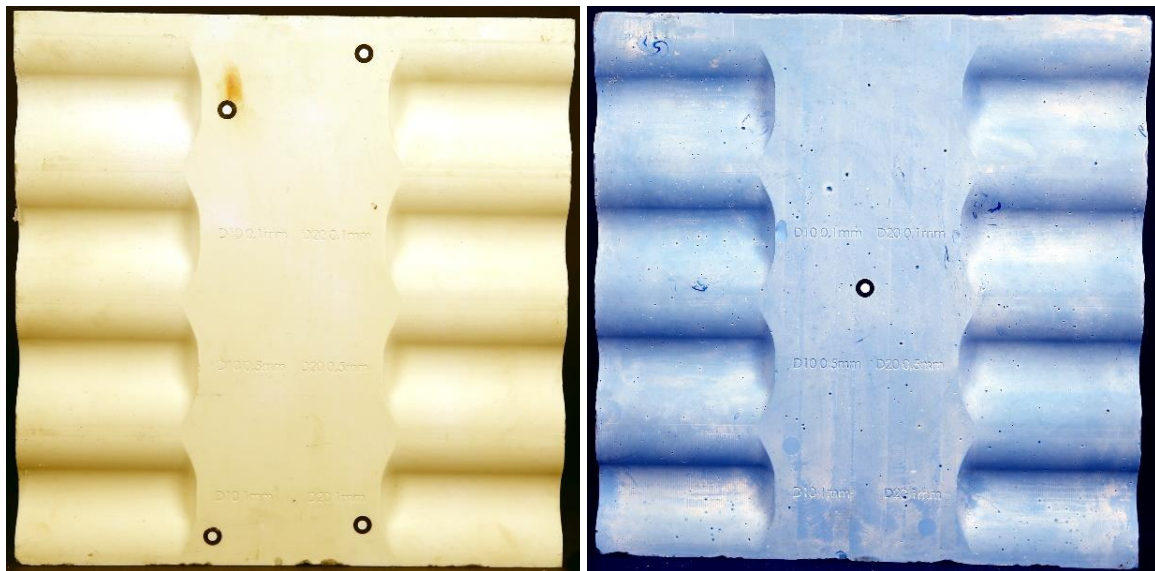


Abbildung 4-23: Wachsschalungen mit Scan-Referenzpunkten nach dem Abguss mit UHPC mit einachsig gekrümmten Flächen, die durch Abfräsen mit einem Vollradiusfräser ( $\varnothing = 10 \text{ mm}$  jeweils auf der linken Seite und  $\varnothing = 20 \text{ mm}$  jeweils auf der rechten Seite) mit unterschiedlichen Fräsbahnabständen  $x = 1 \text{ mm}$ ,  $x = 0,5 \text{ mm}$  und  $x = 0,1 \text{ mm}$  (jeweils je Mulde v. u. n. o.) hergestellt wurden: CFW Wachs (links), PW3146 (rechts).

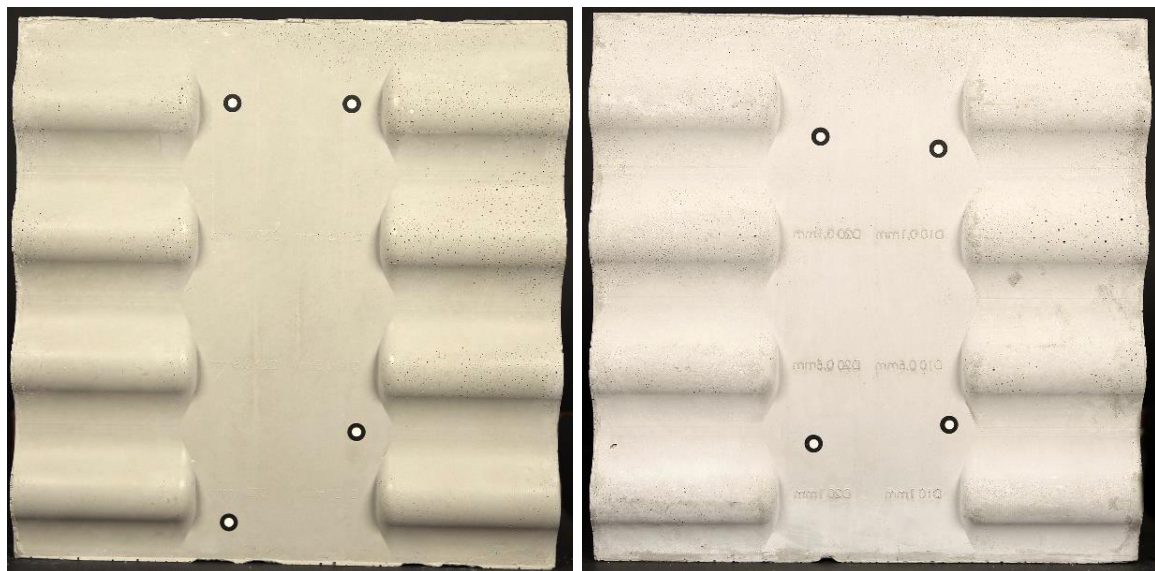


Abbildung 4-24: UHPC Abgüsse mit Scan-Referenzpunkten der Wachsschalungen aus Abbildung 4-23, Abguss auf CFW (links), Abguss auf PW3146 (rechts)

Die Oberflächen der UHPC Abgüsse der Schalungen aus reinem CFW zeigen dabei, wie in Abbildung 4-25 im Detail dargestellt, folgende Erkenntnisse:

- Bei einem Fräsbahnabstand  $x = 1 \text{ mm}$  entstehen optisch und haptisch zu erkennende Rillen.
- Bei einem Fräsbahnabstand  $x = 0,5 \text{ mm}$  sind die Rillen auf dem Wachs optisch noch zu erkennen, jedoch auf dem UHPC Abguss optisch kaum noch erkennbar, aber haptisch fühlbar.
- Bei einem Fräsbahnabstand von  $x = 0,1 \text{ mm}$  sind kaum noch Rillen optisch zu erkennen und die Oberfläche wirkt optisch und haptisch absolut glatt.
- Im Vergleich zwischen den entstehenden Rillen beim verwendeten Vollradiusfräser  $\varnothing = 20 \text{ mm}$  zum  $\varnothing = 10 \text{ mm}$  sind diese bei den jeweiligen Fräsbahnabständen nahezu analog, aufgrund des kleineren Radius aber jeweils geringfügig stärker ausgeprägt.

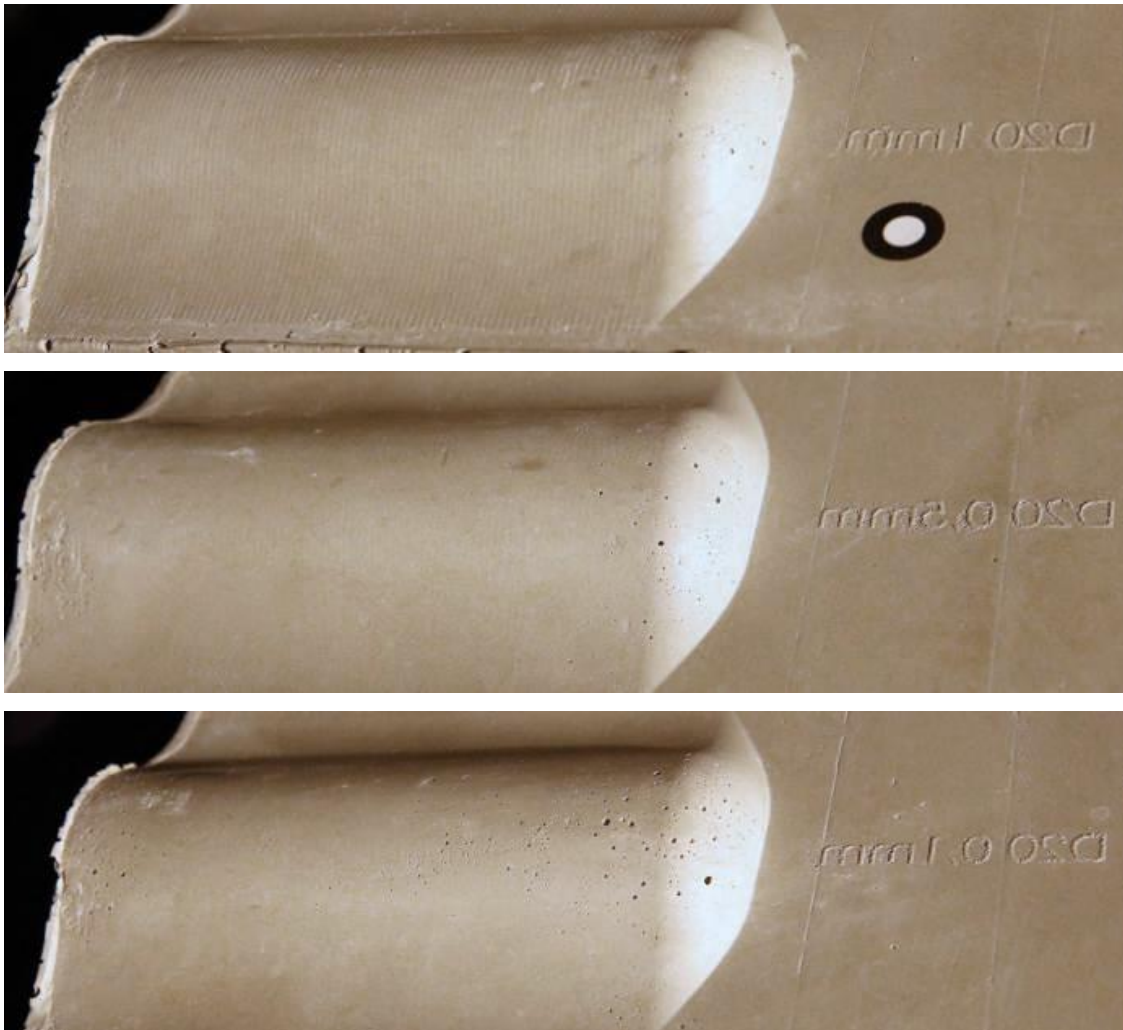


Abbildung 4-25: Details der Oberflächen vom UHPC Abguss (Abbildung 4-24, links), hergestellt mit einem Vollradiusfräser  $\varnothing = 20 \text{ mm}$  mit unterschiedlichen Fräsbahnabständen  $x$ :  $x = 1 \text{ mm}$  – Rillen optisch und haptisch zu erkennen (oben),  $x = 0,5 \text{ mm}$  – Rillen nur haptisch feststellbar (Mitte),  $x = 0,1 \text{ mm}$  – optisch und haptisch glatt (unten)

#### 4.2.4 Fazit der Grundlagenuntersuchungen für die Herstellung von Wachsschalungen

Aus den am IWF in Zusammenarbeit mit dem ITE durchgeführten und in diesem Kapitel dargestellten Grundlagenuntersuchungen lassen sich für die Herstellung von Wachsschalungen folgende Erkenntnisse und Empfehlungen ableiten:

##### Wachsauswahl

Obwohl das Wachs PW 3164 bessere physikalisch-mechanische Eigenschaften (u. a. höherer E-Modul, größere Festigkeit und geringere thermische Dehnung) aufweist, zeigte es doch eine größere Neigung zu Kantenausbrüchen, und der im Wachs enthaltene Füllstoff Terephthalsäure führte zu einem höheren Verschleiß an einigen Werkzeugen sowie zu einem Ansäuern der finalen Betonoberflächen der erstellten Abgüsse aus UHPC. Aus diesen Gründen sollte PW 3146 nicht als Schalungsmaterial für UHPC und Betonbauteile verwendet werden und wird daher von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Als Wachs für die Herstellung von Schalungen wird deswegen ausschließlich das CFW verwendet, mit welchem sich sehr gute Ergebnisse erzielen lassen.

##### Fräser und Bearbeitungsparameter

Für das Planfräsen (glatte Oberflächen mit geringen Rauheiten) und die Schruppbearbeitung (möglichst hohes Zeitspannvolumen) großformatiger Wachsschalungen scheint die Verwendung von walzenstirnartigen Fräsern mit einer hohen Zustellung und geringen Vorschubgeschwindigkeiten besser geeignet zu sein als die Verwendung von Messerkopffräsern mit geringer Zustellung und hoher Vorschubgeschwindigkeit, da die Schneiden der walzenstirnartigen Fräser langsamer in den Werkstoff eindringen und den Span besser schneiden und abtransportieren. U. a. scheint auch ein hoher Drallwinkel<sup>17</sup> wie beim verwendeten Walzenstirnfräser (Drallwinkel 40°) einen positiven Einfluss auf die Bearbeitung von Wachs zu zeigen. Dieser positive Einfluss eines hohen Drallwinkels scheint sich dabei auch bei den verwendeten Schaftfräsern (Drallwinkel 30°) zu zeigen. Zudem sollten die verwendeten Fräser über ausreichend Freiraum zwischen den einzelnen Schneiden verfügen, um einen guten Abtransport der Späne zu gewährleisten und die Zusetzung des Fräasers zu verringern. Prinzipiell sind daher Fräser mit einer möglichst geringen Schneidenanzahl bis hin zu Einzahnfräsern empfehlenswert.

##### Frässtrategie und Fräsbahnplanung

Als Frässtrategie für den Schruppvorgang (z. B. Walzenstirnfräser Durchmesser  $d = 63 \text{ mm}$ ,  $z = 4$ ) wird zum Erreichen eines maximalen Zeitspannvolumens empfohlen, diesen mit einer hohen Vorschubgeschwindigkeit (ca.  $v_f = 10 \text{ m/min}$ ; ca.  $f_z = 0,5 \text{ mm}$ ), maximal möglicher Zustellung ( $a_p$ ) des Fräasers und einer Schnittbreite ( $a_e$ ) bis hin zum vollen Fräskopfdurchmesser durchzuführen. Die Schnittgeschwindigkeit ( $v_c$ ) sollte dabei ca.  $1000 \text{ mm/min}$  betragen. Zwar werden dabei auftretende Abplatzungen am Wachskörper in Kauf genommen, diese sollten aber durch ein entsprechendes allseitiges Aufmaß von min.  $2 \text{ cm}$  im Schlichtgang entfernt werden können.

Als Frässtrategie für den anschließenden Schlichtvorgang der endgültigen, vornehmlich ebenen oder leicht gekrümmten Flächen mit einem zylinderförmigen Fräser (z. B. Schaftfräser Durchmesser  $d = 25 \text{ mm}$ ,  $z = 3$ ) wird empfohlen, diese in der Reihenfolge von hohen zu tiefen Flächen in einzelnen Schlichtgängen zu bearbeiten. Hierdurch können ggf. auftretende lokale Randkantenabplatzungen, die bei der Bearbeitung mit der Stirnseite des Fräasers auftreten können, im jeweils folgenden Schritt entfernt werden. Die Zustellung ( $a_p$ ) sollte  $2 \text{ cm}$  nicht überschreiten und die Schnittbreite ( $a_e$ ) sollte unter dem halben Fräskopfdurchmesser liegen. Die Schnittgeschwindigkeit ( $v_c$ ) sollte bei ca.  $600 \text{ mm/min}$  liegen und es sollten moderatere Vorschubgeschwindigkeiten ( $v_f$ ) unter  $6 \text{ m/min}$  (ca.  $f_z = 0,25 \text{ mm}$ ) gefahren werden.

---

<sup>17</sup> Der Drallwinkel oder Spiralwinkel bezeichnet den Winkel der Hauptschneide eines Fräasers zu seiner Rotationsachse [159].



Als Frässtrategie für den abschließenden Schlichtvorgang der endgültigen, vornehmlich stark multidirektional gekrümmten Flächen durch Abzeilen mit Vollradiusfräsern (z. B. Vollradiusfräser Durchmesser  $d = 20$  mm,  $z = 2$ ) sollten die Bearbeitungsparameter der zylinderförmigen Fräser für den Schlichtvorgang übernommen werden. Prinzipiell ist die Wahl des Fräsbahnabstandes, also die Schnittbreite ( $a_e$ ), beim Freiformfräsen zum Erreichen der gewünschten Oberflächengüte oder zur Einhaltung einer bestimmten Bearbeitungszeit der Entscheidung des Anwenders vorbehalten, sollte aber ebenfalls höchstens unter dem halben Fräskopfdurchmesser liegen. Zum Erreichen einer im Sinne der Architektur optisch glatten Sichtbetonoberfläche, wie diese z. B. von Bauherren bei Fassadenelementen oft verlangt wird, ist die Verwendung eines Fräsbahnabstandes von  $x = 0,5$  mm zu empfehlen. Dieser Fräsbahnabstand stellt bei den verwendeten Vollradiusfräsern und unter Verwendung des in geringen Maßen nivellierenden Trennmittels (Schalwachs: GRACE Ciri LM-33) eine geeignete Prozesskonstellation im Hinblick auf die Oberflächengüte und die Bearbeitungszeit dar.

#### **Anhaftung von Spänen an Fräsern und am Werkstück (Wachsschalung)**

Obwohl durch den Einsatz von polymerer (Kühl-)Lösung oder Druckluft zum Kühlen bei der Fräsbearbeitung keine besseren Oberflächenqualitäten erreicht werden können, kann durch ihren Einsatz die Anhaftung von Spänen an den Fräsern und dem Werkstück durch polymere (Kühl-)Lösung komplett und bei Druckluft weitestgehend vermieden werden.

Bei Bearbeitungszentren, die nicht speziell für die Abfuhr von Wachsspänen ausgelegt sind (wie die hier am IWF verwendete DMU-100-Monoblock), ist der Einsatz von polymerer (Kühl-)Lösung allerdings technisch schwierig. Durch die gespülten Wachsspäne kam es am IWF zu einer sehr nachteiligen Agglomeration von Spänen in den schmiermittelfördernden Leitungen und zu Verstopfungen der Spaltsiebe. Dieses technisch zu vermeiden, ist nach Aussage des IWF mittels eines geeigneten Spanabfuhrkonzeptes (z. B. Einsatz von Schwerkraft-Anschwemmfiltern, Grobfiltern, Bandfiltern und Kammerfiltern) möglich, aber technisch sehr aufwendig. Zudem sollten die Späne für ein sortenreines Recycling vorab durch Spülen mit Wasser wieder von der polymeren (Kühl-)Lösung vollständig getrennt und für das Wiedereinschmelzen getrocknet werden (vergl. 4.4.2). Aufgrund dieser Komplexität und dem damit verbundenen hohen Gesamtaufwand, wird die Verwendung von polymerer (Kühl-)Lösung beim Fräsen von Wachs nicht empfohlen.

Obwohl weniger effizient, hat sich für das Fräsen von Wachs als beste Alternative der Einsatz von eingeblasener, möglichst kühler Druckluft herausgestellt. Hierdurch werden die Späne vom Werkstück und vom Fräser während des Fräsprozesses ebenfalls entfernt, dabei aber nicht verunreinigt bzw. feucht. Zudem kühlt die Druckluft den Fräser, sodass Anhaftungen durch Aufschmelzen des Wachses deutlich reduziert werden. Durch Kombination mit einer Absauganlage, welche die Späne nahe der Zerspanstelle erfasst, könnte das zerspannte Wachs automatisiert wieder in den Recyclingprozess bzw. den Schmelzkessel zugeführt werden.



### 4.3 Außen-Wachsschalungen

Die bisher vorgestellten Untersuchungen dienen als Grundlage für die 5-Achs-Bearbeitung der nachstehend vorgestellten formstabilen<sup>18</sup> größerformatigen Außen-Wachsschalungen. Hierbei werden die in den vorherigen Schritten gewonnenen Erkenntnisse für die Fertigung übernommen bzw. verifiziert. Als Wachs für diese Untersuchungen wurde aus den in Kapitel 4.2.3 benannten Gründen ausschließlich CFW verwendet.

Ziel dieser Untersuchungen ist dabei die Überprüfung, mit welcher Präzision unterschiedliche geometrische Formen auf Außen-Wachsschalungen und den damit hergestellten Beton bzw. UHPC Bauteilen hergestellt werden können und ob ggf. Skalierungseffekte, wie u. a. innere Spannungen in den Wachsböcken, einen negativen Einfluss auf diese Ergebnisse haben.

Da die für diese Versuchsreihe herzustellenden Wachsschaltafeln am IWF auf dem Bearbeitungszentrum Typ DMU-100-Monoblock in einer 5-Achs-Bearbeitung gefräst werden, begrenzt der vorhandene Bauraum die maximalen Abmessungen der Wachsschaltafeln auf 500 mm x 500 mm x 120 mm (Breite / Länge / Höhe).

#### 4.3.1 Entwurf von Referenzgeometrien (Formenbausteine)

Da nicht alle freien geometrisch komplexen Formen von möglichen Betonbauteilen im Forschungsvorhaben untersucht werden können, wurde für die Untersuchungen eine Auswahl an repräsentativen geometrischen Formen erstellt, an denen die Potentiale der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie beispielhaft dargestellt werden. Diese – im Folgenden „Formenbausteine“ genannten abstrakten Referenzgeometrien – decken dabei eine Vielzahl von möglichen Bauteilgeometrien ab und konzentrieren sich auf komplexe Formen mit starken Krümmungen, Krümmungsradien der Krümmungskategorien (KK) 4, mit zusätzlich starken Texturen und Detaillierungen (vergl. 2.2.4), wie sie für die Herstellung von CNC gefrästen Schalungen (vergl. 2.3.3) prädestiniert sind. Zudem orientieren sich einige der Formenbausteine an Testgeometrien, welche an der TU München am Lehrstuhl für Holzbau von Prof. Dr. Winter für das selektive Binden von Holzspänen mit Zement entworfen wurden [147].

Die erstellten Formenbausteine, wie in Abbildung 4-26 beispielhaft dargestellt, beinhalten dabei möglichst alle geometrischen Einzelelemente bzw. -formen, welche ein komplexes freigeformtes Betonbauteil annehmen kann, und umfassen dabei die folgenden Hauptbestandteile:

- Stege und Nuten
- Kegel und pyramidenförmige Stümpfe
- ein- und zweiseitig konvex und konkav gekrümmte Oberflächen mit unterschiedlichen Radien
- historisch inspirierte Elemente
- parametrisch strukturierte Oberflächen

Die einzelnen, zum Teil im zweidimensionalen schwer beschreibbaren, dreidimensionalen Formenbausteine sind in Anhang H im sogenannten Formenbausteinkatalog detailliert beschrieben.

---

<sup>18</sup> Der Begriff „formstabil“ oder formerhaltende Geometrien sind bezogen auf Betonbauteile-Geometrien, die ohne eine Zerstörung oder Verformung der Schalung entformbar bzw. ausschaltbar sind, daher einen maximalen Wandungswinkel von  $> 90^\circ$  zur Grundebene aufweisen müssen und somit keine Hinterschnitte besitzen dürfen.

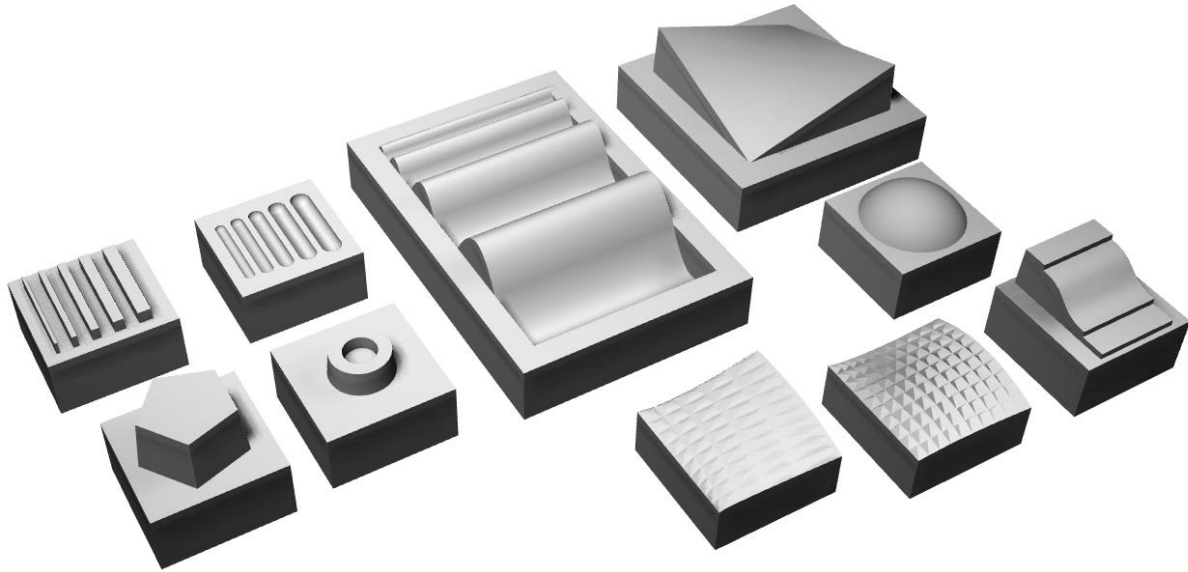


Abbildung 4-26: Beispiele für verschiedene Typen von Formenbausteinen

Im Folgenden wurden in Abstimmung mit dem IWF Formenbausteine aus dem Formenbausteinkatalog ausgewählt und zu den digitalen CAD Modellen der Wachsschaltafeln Block A und B, wie in Abbildung 4-27 dargestellt, zusammengefügt.

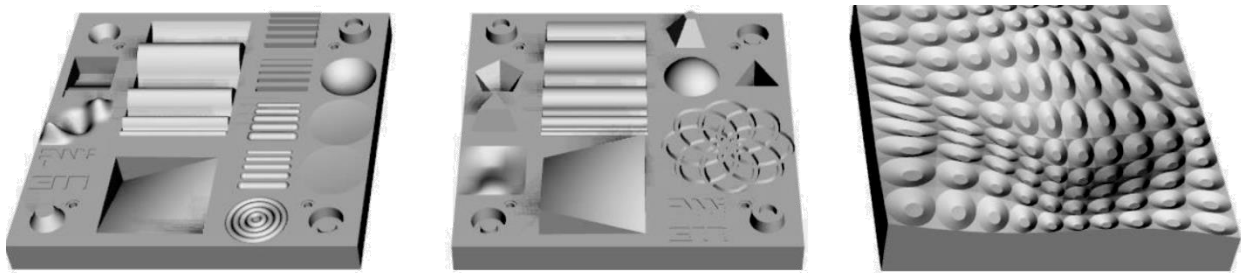


Abbildung 4-27: Digitale CAD Modelle der Wachsschaltafeln: Block A (links), Block B (Mitte), Block C parametrisch (rechts)

Die visuelle Programmiersprache bzw. -umgebung mit der Bezeichnung *Grasshopper* als Zusatzmodul für das 3D CAD Programm *Rhinoceros* der Firma *McNeel* findet in den letzten Jahren verstärkt Anwendung in architektonischen Entwürfen und erlaubt eine parametrische Modellierung von Geometrien, wie sie unter anderem für den Entwurf von UHPC Fassadenplatten immer stärker eingesetzt wird. Da sich die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie prinzipiell für die Herstellung solcher, meist als Unikate vorgesehener, UHPC Fassadenplatten eignet, wurde zur beispielhaften Darstellung dieser Anwendungsmöglichkeit ein entsprechendes einfaches visuelles Programm bzw. Skript mit *Grasshopper* erstellt (Abbildung 4-28, links), mit welchem die Geometrie der Wachsschaltafel Block C generiert wurde. Mit dem Programm lassen sich dabei über diverse einstellbare Parameter, wie z. B. Rasterdichte, Höhenpunkte und Kegelform, einfache parametrisch strukturierte Oberflächen erstellen (Abbildung 4-28, rechts).

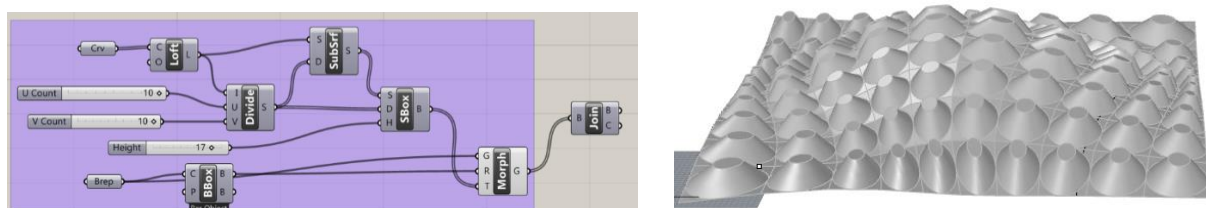


Abbildung 4-28: Einfaches visuelles Programm, um mit Grasshopper im 3D CAD Programm Rhinoceros der Firma McNeel eine parametrisch strukturierte Oberfläche zu erzeugen (links), mögliches parameterabhängiges Ergebnis (rechts)

#### 4.3.2 Herstellung der Referenz-Wachsschalungselemente durch subtraktive Bearbeitung (Fräsen)

Zur Fertigung der Wachsschaltafeln wurden die CAD-Daten (Blöcke A, B und C) vom ITE an das IWF übergeben und im CAM-System Solid CAM 2015 der NC-Code für die Fräsbearbeitung erstellt. Je nach geometrischer Komplexität wurde für die Bearbeitung je Block eine Vielzahl unterschiedlicher Fräswerkzeuge benutzt. Für die Fräsbearbeitung des Blocks A wurden auf dem Bearbeitungszentrum DMU-100-Monoblock z. B. insgesamt neun unterschiedliche Werkzeuge (Schafffräser und Kopierfräser) mit Durchmessern von  $d = 16 \text{ mm}$  bis  $d = 1,5 \text{ mm}$  verwendet.

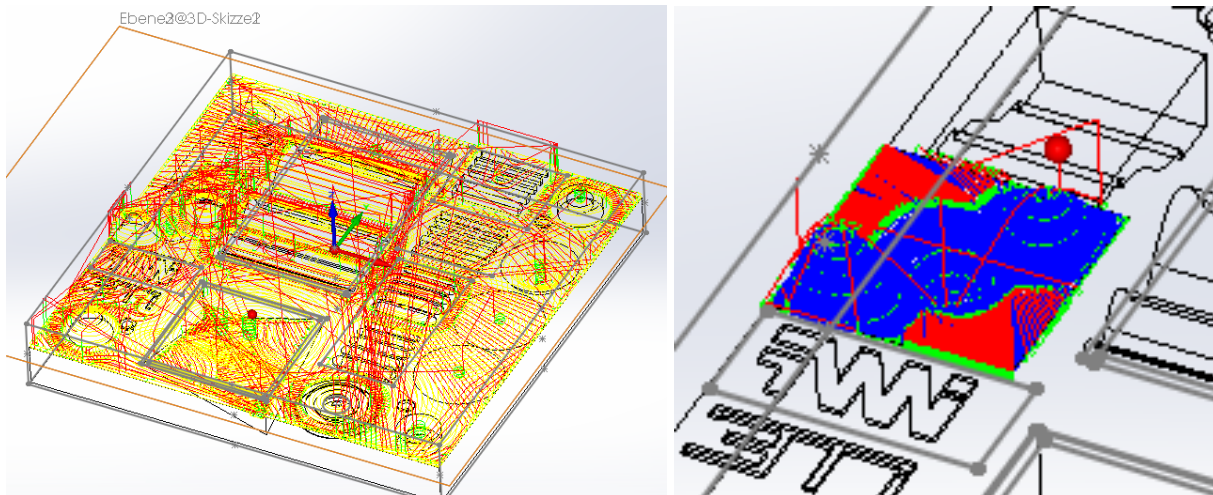


Abbildung 4-29: Beispiel Fräsbahnplanung Wachsschaltafel Block A: Schruppbearbeitung mit Schafffräser  $d = 16 \text{ mm}$ ,  $n = 9776 \text{ U/min}$ ,  $v_f = 5024 \text{ mm/min}$  (links); Kopierfräser (Vollradiusfräser)  $d = 7 \text{ mm}$ ,  $n = 10004 \text{ U/min}$ ,  $v_f = 1120 \text{ mm/min}$  für die Bearbeitung der stark gekrümmten Freiformfläche des Formenbausteins Nr. 7.2 (rechts)

Für die in Abbildung 4-29, links dargestellte Schruppbearbeitung des Blocks A wurde dabei z. B. ein Schafffräser  $d = 16 \text{ mm}$  mittels Trochoidalfräsen eingesetzt, sodass mit optimierten Schnittbedingungen möglichst viel Werkstoff zerspannt wird. Beim Trochoidalfräsen wird der Fräser bis zur gesamten Schneidenlänge ( $a_p$ ), dabei aber ein geringer Schneideneingriff ( $a_e$ ) eingesetzt und zudem eine recht hohe Vorschubgeschwindigkeit ( $v_f = 5 \text{ m/min}$ ) gefahren. Im Folgenden werden die einzelnen Formenbausteine, wie beispielhaft in Abbildung 4-29, rechts dargestellt, ebenfalls individuell und mit je nach Strukturfeinheit benötigten Werkzeugdurchmessern im Schlichtgang bearbeitet. Die Fertigung der weiteren Wachsschaltafeln fand ebenfalls am IWF auf dem Bearbeitungszentrum DMU-100-Monoblock statt und die hergestellten Wachsschaltafeln sind in Abbildung 4-30 dargestellt. Die Schnittzeiten bei der Fertigung der einzelnen Wachsschaltafeln betrugen dabei für Block A: 7h 46min, Block B: 5h 30min und Block C: 4h 33 min.



Abbildung 4-30: Am IWF gefertigte Wachsschaltafeln Block A (links), Block B (Mitte), Block C (rechts)

Durch die Herstellung der größeren und geometrisch deutlich komplexeren Wachsschalungen (Wachsschaltafeln) wurde durch das IWF gezeigt, dass eine effiziente Bearbeitung möglich ist und dabei keine Maßstabeffekte auftreten. Trotz der zufriedenstellenden Resultate stellte sich bei der Bearbeitung der mit zunehmender Strukturtiefe erschwerte Spanabtransport als herausfordernd dar, da

er teilweise zum Aufschmelzen des Waxes und dadurch zu Anhaftungen am Werkstück und besonders bei kleinen Fräsern zu Zersetzungen des Werkzeugs führte. Während der Bearbeitung musste daher der Fräsprozess regelmäßig unterbrochen werden, um die Fräswerkzeuge von anhaftendem Wachs zu säubern. Die an den Wachsschaltafeln anhaftenden Späne wurden in einer händischen Nachbearbeitung durch Bürstenoperationen mit Polyamidborsten und bei stärkeren Anhaftungen durch Schaben mit einer metallischen Klinge entfernt.

##### 4.3.3 Herstellung der Referenzprobekörper

Die am IWF gefrästen Wachsschaltafeln wurden mit kunststoffbeschichteten Furniersperrholzplatten eingefasst, mit Silikon abgedichtet und mit einer dünnen Schicht Trennmittel (Schalwachs: Typ GRACE Ciri LM-33) eingestrichen. Anschließend wurden die Schalungen mit UHPC ND-2,5 (Typ Dyckerhoff Nanodur, gemäß Tabelle 5) ausgegossen. Bei Block A wurde der UHPC über eine Rinne zur Unterstützung der Entlüftung und bei Block B und C durch direktes Gießen aus einem Eimer eingebracht (Abbildung 4-31), wodurch eine geringere Oberflächenporigkeit beim Abguss des Blocks A gegenüber B festgestellt werden konnte. Zum Lösen des ausgehärteten UHPC von der Wachsschalung wurden die in Kapitel 4.1.2.2 beschriebenen Ausschalhilfen in den Wachsschalungen vorgesehen und zum Ausschalen nach einer Abbindezeit des UHPC von 6 Tagen unter Wasser verwendet.

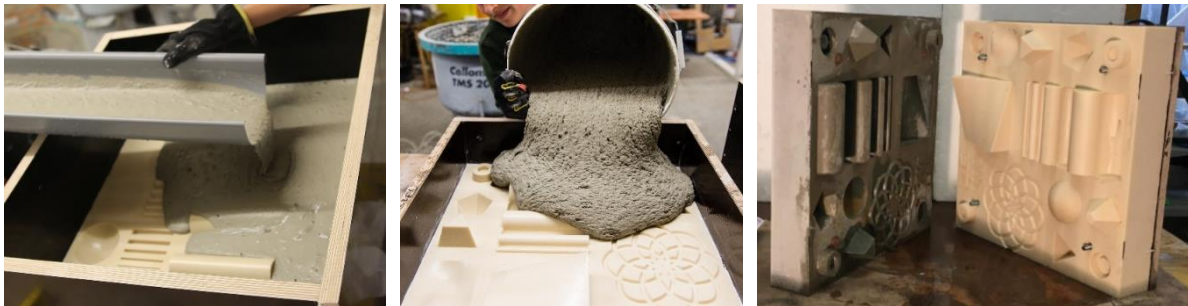


Abbildung 4-31: Betonieren mit UHPC ND-2,5 (Typ Dyckerhoff Nanodur – Tabelle 5): Block A Einbringen über Rinne zum Entlüften (links), Block B Einbringen durch direktes Gießen aus Eimer (Mitte), von der Wachsschalung getrennter Block B direkt nach dem Entschalen (rechts)

Durch den visuellen Vergleich der mit UHPC abgegossenen Wachsschalungen (Abbildung 4-32, Abbildung 4-33, Abbildung 4-34, jew. links ) und den UHPC Abgüssen selbst (Abbildung 4-32, Abbildung 4-33, Abbildung 4-34, jew. rechts) zeigen sich die geometrischen Möglichkeiten und Einschränkungen der Wachsschalungstechnologie. Die in Abbildung 4-32, links am Rand der Wachsschalung Block A zu sehenden Abplatzungen entstanden, da beim Ausschalen vor dem Eindrehen der Maschinenschrauben noch kein Wasser bzw. Druckluft durch die Bohrungen eingepresst wurde und der UHPC-Abguss nicht ohne das Eintreiben zusätzlicher seitlicher Keile von der Wachsschalung gelöst werden konnte.



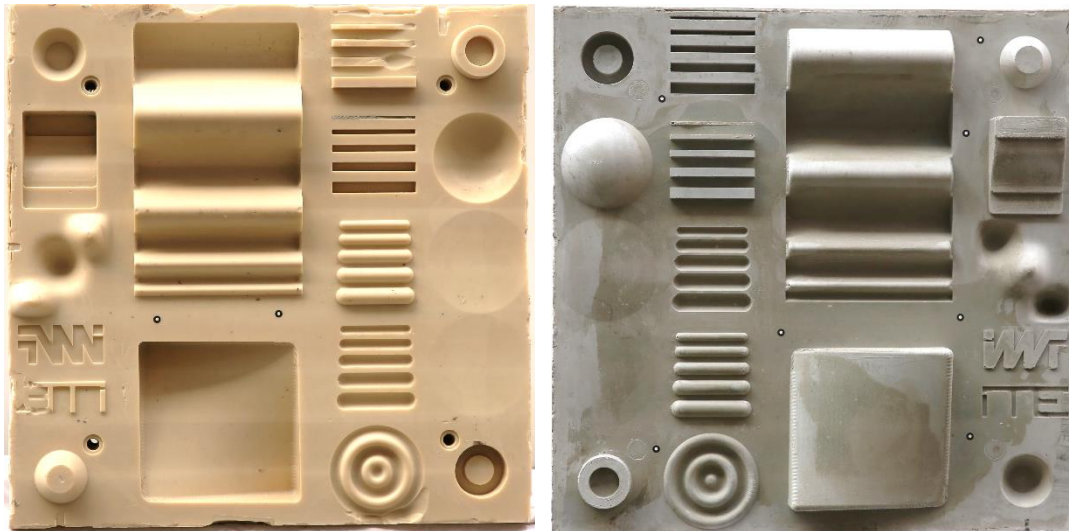


Abbildung 4-32: Wachsschalung Block A nach dem Ablösen vom UHPC (links), UHPC-Abguss des Blocks A (rechts)

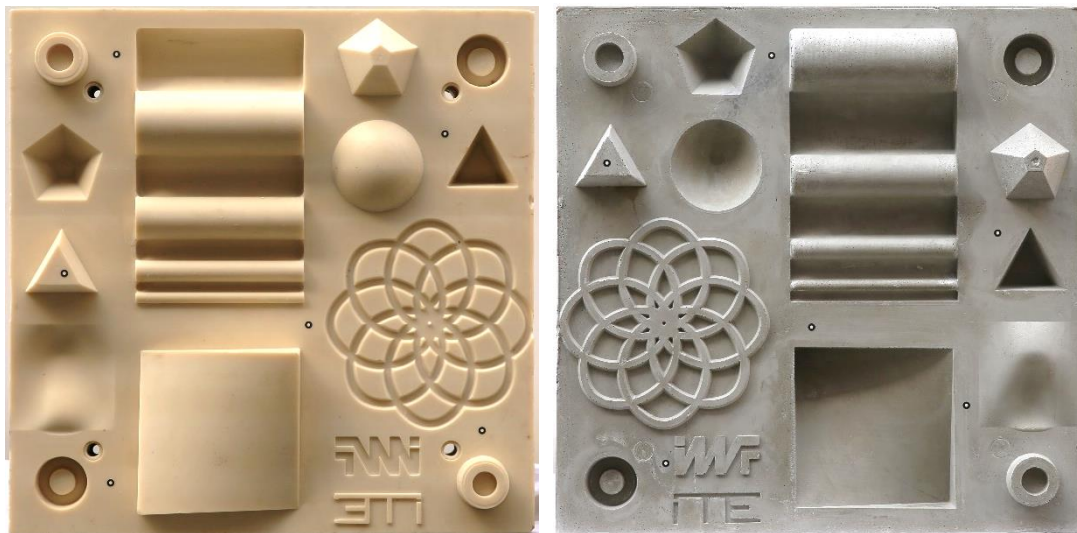


Abbildung 4-33: Wachsschalung Block B nach dem Ablösen vom UHPC (links), UHPC-Abguss des Blocks B (rechts)

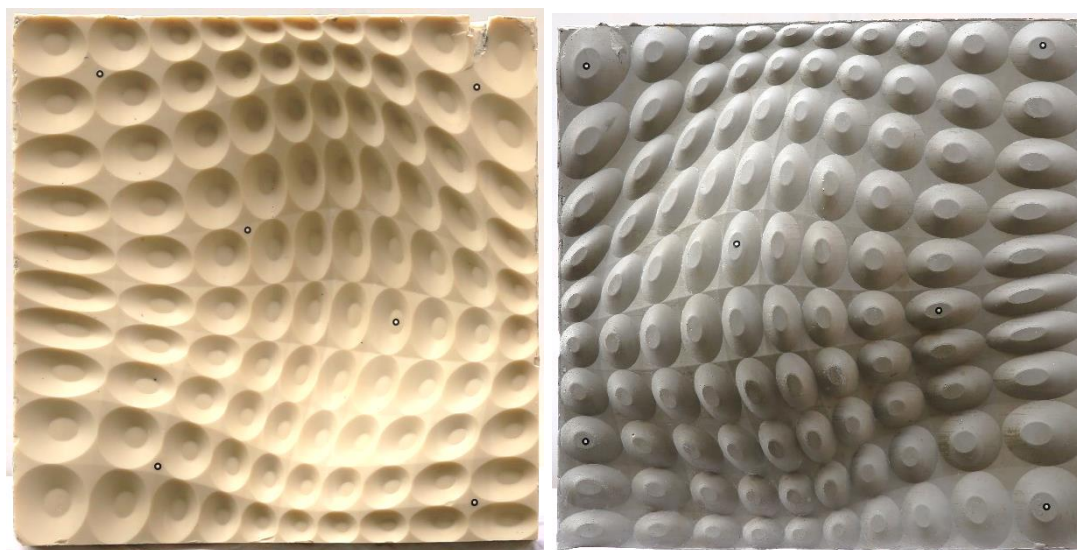


Abbildung 4-34: Wachsschalung Block C nach dem Ablösen vom UHPC (links), UHPC-Abguss des Blocks C (rechts)



Generell lässt sich dabei feststellen, dass mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie auch großformatige, stark strukturierte Bauteile aus UHPC detailgetreu hergestellt werden können. Besonders die robusten uni- und multidirektional gekrümmten Oberflächen, die runden und pyramidenförmigen Stümpfe sowie die abgerundeten Stege und Nuten zeigen ein sehr stabiles und detailgetreues Abformungsverhalten im UHPC. Einschränkungen sind hingegen in den Abformungen feingliedriger Elemente, wie der Schrift und den rechteckigen Stegen und Nuten bei Block A, zu finden.

Bei den herausstehenden rechteckigen Stegen auf dem Wachsblock A (seitlicher Entformungswinkel von 2°) kann festgestellt werden, dass diese ab einem Aspektverhältnis größer 1 (Höhe / Breite) beim Ausschalen abreißen. Bei den Nuten verhält es sich ähnlich, nur dass hier ab einem Aspektverhältnis größer 4 der UHPC beim Ausschalen abreißt und in der Wachsschalung verbleibt. Die so aufgezeigten Grenzen sind beim Entwurf von Betonbauteilen unter Verwendung von Wachsschalungen zu berücksichtigen.

#### **4.3.4 Überprüfen der Maßhaltigkeit der gefrästen Schalungselemente und erstellten Betonkörper mithilfe optischer 3D-Messtechnik**

Die Wachsschalungen (Wachsschaltafeln) wurden jeweils vor und nach dem UHPC-Abguss zusammen mit den jeweils ersten UHPC-Abgüssen bei der Firma GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH in Braunschweig) mit einem handelsüblichen 3D-Scanner (optische 3D-Messtechnik – Typ ATOS) digitalisiert. Die digitalen optischen 3D-Messdaten wurden dazu verwendet, mit der Software GOM Inspect [148] eine Form- und Maßanalyse im Vergleich zu den ursprünglichen CAD-Daten durchzuführen. Im Folgenden werden die Form- und Maßanalysen für die Wachsschalungsblöcke A, B und C und deren Abguss aus UHPC vorgestellt.

##### **4.3.4.1 Form- und Maßanalyse der Wachsschalungen vor dem Abguss mit UHPC**

Der Vergleich der optischen 3D-Messdaten (kurz 3D-Scandaten) mit den CAD-Datensätzen der jeweiligen Wachsschalungsblöcke (Abbildung 4-35, Abbildung 4-36 und Abbildung 4-37) zeigt in Falschfarbenbildern jeweils den senkrechten Abstand (Abweichung) jedes einzelnen gescannten Polygonpunktes (IST des real hergestellten Wachsblockes) in Bezug zu dem originalen Wert in der CAD-Zeichnung (SOLL). Zur beispielhaften quantitativen Darstellung der Abweichungen wurden zusätzliche Abweichungsfähnchen mit Angabe der genauen Abweichung auf den Falschfarbenbildern positioniert.

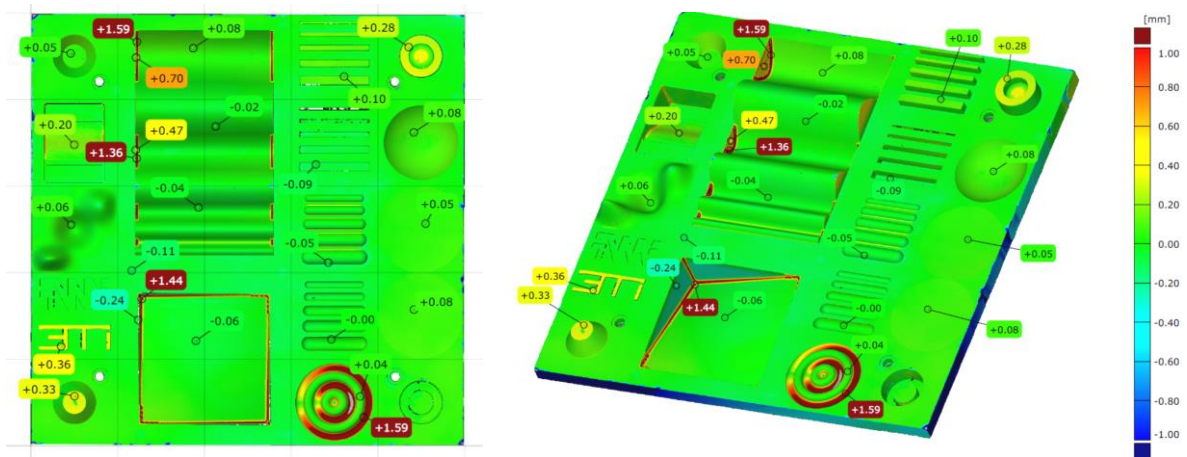


Abbildung 4-35: Abweichungen zwischen Scandaten des Wachsblocks A und dem CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts) in mm

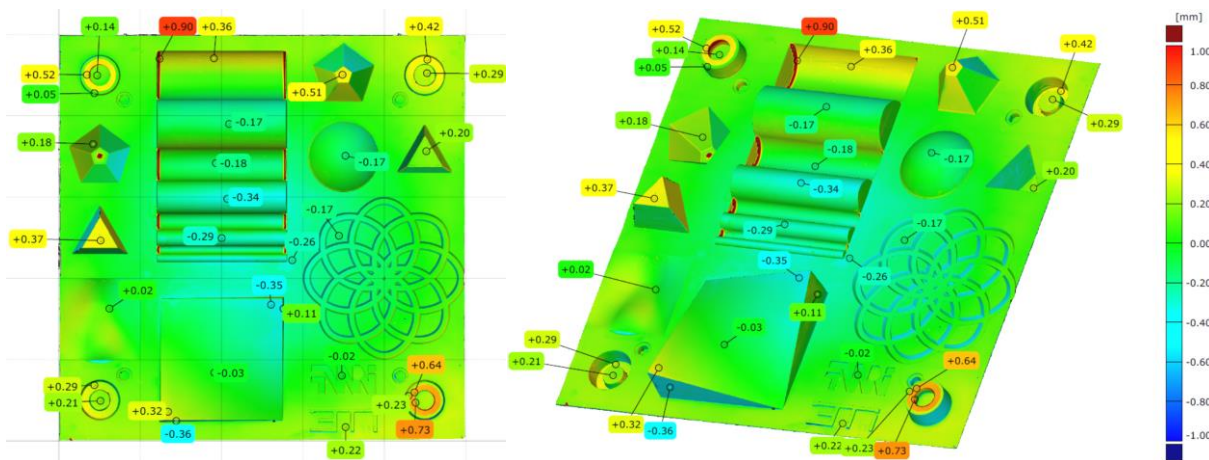


Abbildung 4-36: Abweichungen zwischen Scandaten des Wachsblocks B und dem CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts) in mm

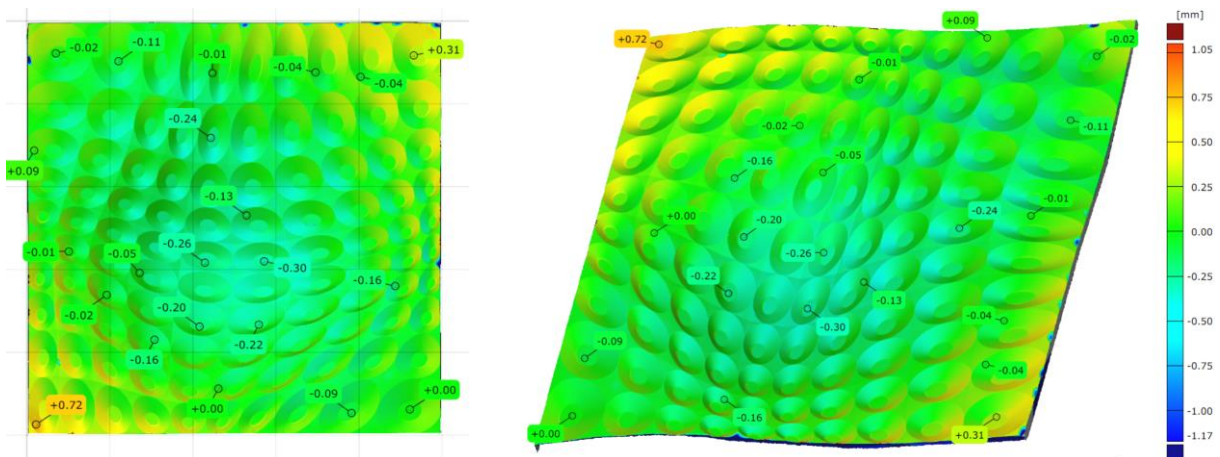


Abbildung 4-37: Abweichungen zwischen Scandaten des Wachsblocks C und dem CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts) in mm

Bei den Wachsschalungen der Blöcke A und B weisen die ebenen sowie uni- und multidirektional gekrümmten Oberflächen eine Präzision im Zehntelmillimeterbereich gegenüber dem ursprünglichen CAD-Datensatz auf. Größere Abweichungen im Millimeterbereich sind bei diesen beiden Blöcken lediglich an den vertikalen bzw. 2° geneigten Innenflanken, an rechtwinkligen Innenkanten und in den Senken der kreisförmigen Wellengeometrie in Block A zu finden. Diese höheren Formabweichungen bis zum Millimeterbereich resultieren dabei wahrscheinlich aus dem Zusammenwirken der bei der Herstellung verwendeten Fräsergeometrie in Verbindung mit der Prozesskinematik und der vorgegebenen Innenkontur des Werkstücks. Obwohl bereits bekannt, zeigt sich hier im Besonderen,

dass rechtwinklige Innenkanten nur annäherungsweise durch CNC Fräsen mit einem Vollradiusfräser hergestellt werden können. Die gemessenen Abweichungen in den Senken der kreisförmigen Wellengeometrie lassen sich teilweise auch auf die nachträgliche händische Nachbearbeitung (vergl. 4.3.2) der Schalungen zur Entfernung von angeschmolzenen Frässpänen zurückführen.

Eine überaus hohe Präzision im Zehntelmillimeterbereich zeigt der parametrische Block C, auch wenn bei diesem Block an der Blaufärbung im Zentrum und Gelbfärbung am Rand ein leichtes Aufschüsseln der Schalung erkennbar ist. Dies lässt darauf schließen, dass im gegossenen Wachsschling, trotz seines optimierten Herstellungsverfahrens, immer noch innere Spannungen vorhanden waren, die sich durch das Entfernen des Wachses im Zentrum dieser Schalung in die leichte Verformung umgewandelt haben (vergl. 4.1.1.5).

##### 4.3.4.2 Form- und Maßanalyse der Wachsschalungen vor und nach dem Abguss mit UHPC

Durch den Vergleich der optischen 3D-Messdaten (Scandaten) der Wachsschalungsblöcke A, B und C vor und nach dem Abguss mit UHPC (Abbildung 4-38) wird deutlich, dass diese auch nach einer Beanspruchung durch den Frischbetondruck des UHPC und der Kräfte beim Ausschalen eine sehr hohe Formtreue aufweisen und ohne weiteres bei einer sachgemäßen Behandlung für eine Vielzahl gleicher Abgüsse mit UHPC wiederverwendet werden könnten.

Beim Ausschalen von Block A wurde keine Druckluft in die Bohrungen bzw. Ausschalhilfen eingepresst, sondern es wurde versucht, die Wachsschalung vom UHPC Abguss durch seitliches Eintreiben von Keilen zu lösen (vergl. 4.3.3). Zwar konnte so die Schalung vom UHPC getrennt werden, durch diese als unsachgemäß anzusehende Behandlung wurde die Wachsschalung am Rand allerdings punktuell verformt bzw. kam es zu leichten Abplatzungen des Wachses (Abbildung 4-32, links und Abbildung 4-38, links).

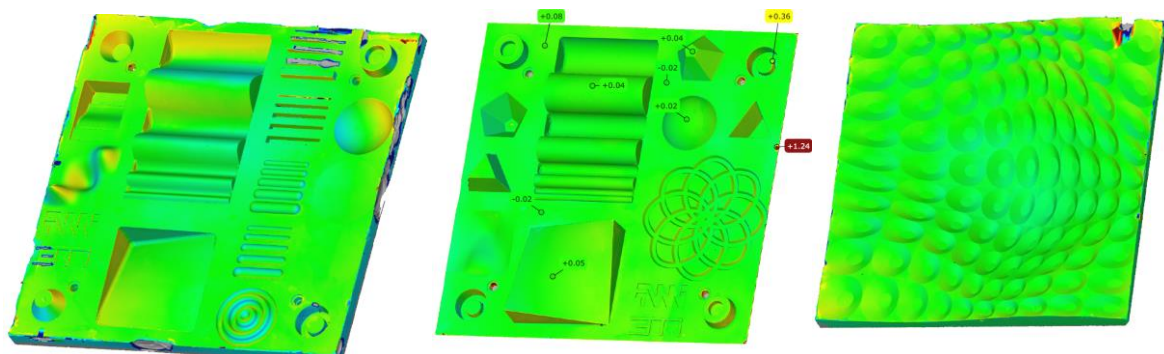


Abbildung 4-38: Abweichungen zwischen Scandaten der Wachsböcke A (links), B (Mitte) und C (rechts) vor und nach dem Abguss mit UHPC in mm

##### 4.3.4.3 Form- und Maßanalyse der UHPC-Abgüsse

In Analogie zu den Abweichungen zwischen den optischen 3D-Messdaten (Scandaten) der Wachsböcke und den jeweiligen CAD-Datensätzen wurden auch die optischen 3D-Messdaten der UHPC-Abgüsse mit den CAD-Datensätzen der herzustellenden Bauteile verglichen. Die UHPC-Abgüsse der Wachsschalungen erreichen dabei gegenüber den CAD-Datensätzen im Flächenabgleich (Abbildung 4-39, Abbildung 4-40 und Abbildung 4-41) eine sehr hohe Präzision und erfüllen die für den Betonbau geltenden Normen (vergl. 2.2.2, Tabelle 3) in allen Bereichen. Wie in Abbildung 4-39 bei Block A beispielhaft zu sehen ist, entstehen durch den UHPC-Abguss Abweichungen an den jetzt invertierten Bereichen der Wachsschalung, wie z. B. einigen Flanken, rechtwinkligen Außenkanten und in den Erhöhungen der kreisförmigen Wellengeometrie, analog zu den bereits beschriebenen Abweichungen der Wachsschalung. Abgesehen von diesen fertigungsbedingten lokalen höheren Abweichungen und trotz der durch das Schwinden des verwendeten UHPC durch Volumenverminderung entstehenden zusätzlichen Abweichungen erreichen die hergestellten UHPC-Abgüsse selbst nach Maßstäben des



Maschinenbau gemäß DIN ISO 2768-1 Tab 1 (Grenzmaße für Längenmaße) [48] etwa die Toleranzklasse „mittel (m)“ und nach DIN ISO 2768-2 Tab.1 (Geradheit und Ebenheit) die mittlere Toleranzklasse „K“. Anhand der durchgeführten Maßanalysen wird deutlich, dass sich das ausgewählte Wachs CFW auch bei vergleichsweise großen Bauteilabmessungen unter Beachtung der geometrischen Einschränkungen des Fräsprozesses sehr präzise spanend bearbeiten lässt und die im Wachs gefertigten Geometrien der UHPC-Abgüsse eine für das Bauwesen überaus hohe Formtreue aufweisen.

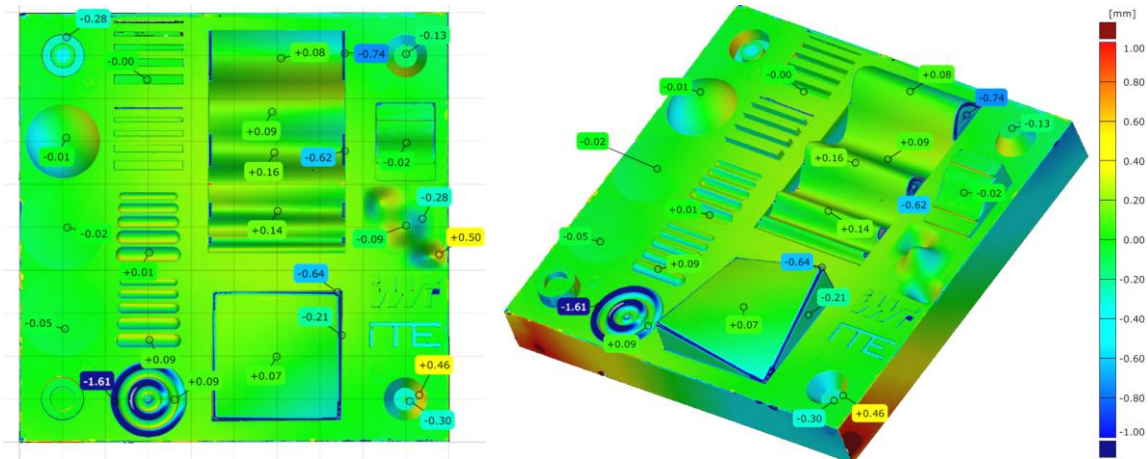


Abbildung 4-39: Abweichung zwischen Scandaten des hergestellten UHPC-Abgusses Block A und CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts)

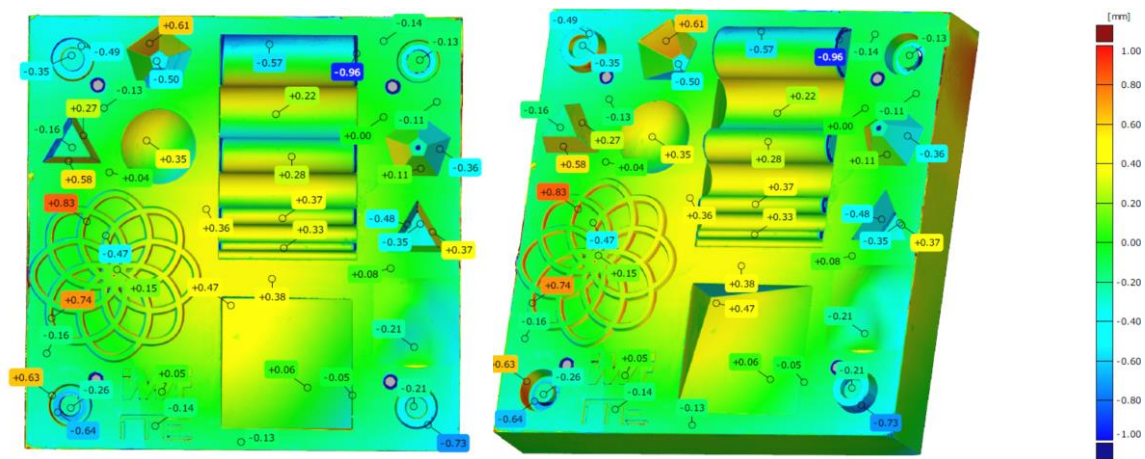


Abbildung 4-40: Abweichung zwischen Scandaten des hergestellten UHPC-Abgusses Block B und CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts)

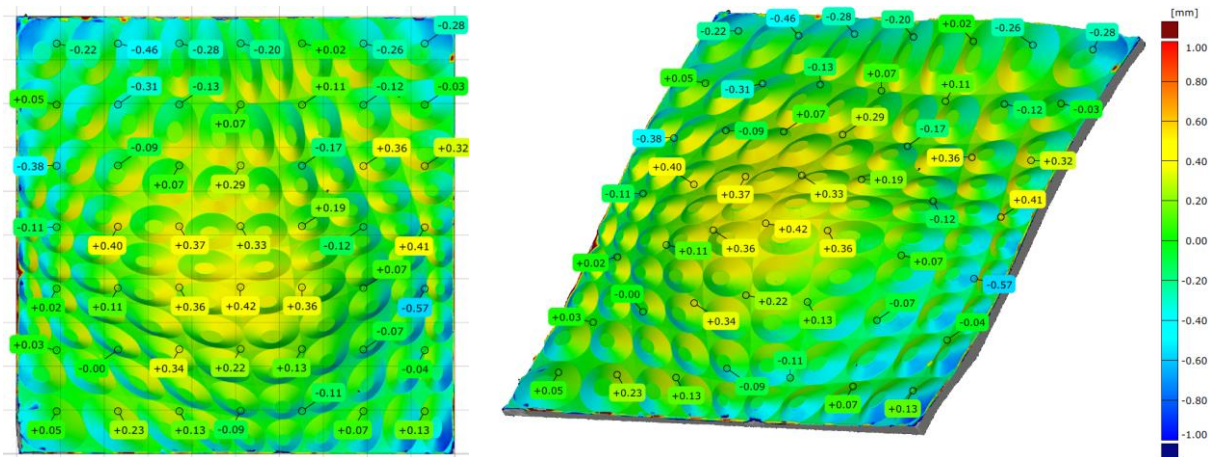


Abbildung 4-41: Abweichung zwischen Scandaten des hergestellten UHPC-Abgusses Block C und CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts)

#### 4.4 Ökonomische und ökologische Aspekte

##### 4.4.1 Materialkosten des CFW Wachses

Damit die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern auch aus ökonomischen Gesichtspunkten wirtschaftlich erfolgreich ist, muss das Wachs möglichst oft in einem geschlossenen Schalungsmaterialkreislauf (sogenannter „Closed Loop Recycling“ Prozess) wiederverwendet werden. Wie in den Anforderungen beschrieben (vergl. 3.2.4), können die Materialkosten des Wachses ( $WAX_{inv}$ ) über die Anzahl der Wiederverwendungen bzw. die Wiederverwendungsrate ( $WAX_{wvr}$ ) abgeschrieben werden und ergeben hierdurch unter Addition der Schmelzenergiekosten ( $Ek_{Schm}$ ) die Materialkosten des Wachses je Einsatz ( $WAX_{jE}$ ) nach Gl (1).

$$WAX_{jE} \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = \frac{WAX_{inv}}{WAX_{wvr}} + Ek_{Schm} \quad (1)$$

Für das CFW Wachs (Dichte 950 kg/m<sup>3</sup>) kann die in der dynamischen Differenzkalorimetriemessung DSC ermittelte Gesamtschmelzenergie (Phasenänderungs- und Erwärmungsenergie zum Erwärmen des Wachses von 20°C auf 85°C) von 233,5 J/g in eine elektrische Energie von 61,53 kWh/m<sup>3</sup> zum Schmelzen umgerechnet werden. Bei angenommenen Strombruttokosten von 0,224 €/kWh ergeben sich hieraus Schmelzenergiekosten ( $Ek_{Schm}$ ) je m<sup>3</sup> und Aufschmelzvorgang von etwa 13,78 €/m<sup>3</sup> (brutto). Durch Nutzung alternativer Primärenergie zum Erhitzen (z. B. Solarenergie) oder von Abwärme anderer Anlagen kann dieser Wert standortabhängig ggf. reduziert werden. Die Materialbruttokosten ( $WAX_{inv}$ ) des CFW sind rohstoffabhängig und liegen laut Hersteller Anfang 2018 bei 4.951 €/m<sup>3</sup> (DAP Incoterms). Im Forschungsprojekt wurde nachgewiesen, dass sich CFW mindestens 50-mal wieder einschmelzen lässt, ohne dass es dabei durch Oxidationsprozesse seine physikalisch-mechanischen Eigenschaften ändert. Basierend auf dieser nachgewiesenen minimalen Wiederverwendungsrate ( $WAX_{wvr}$ ) einer 50-fachen Nutzung ergeben sich nach Gl. (1) Materialbruttokosten des CFW je Einsatz ( $WAX_{jE50}$ ) von 112,8 €/m<sup>3</sup>. Werden diese Materialkosten je Einsatz gegenüber den Materialkosten alternativer „Einweg“-Materialien zur vollautomatisierten Herstellung CNC gefräster Sonderschalungen aufgetragen (Abbildung 4-42), wird deutlich, dass ein vergleichbares Kostenniveau von EPS und XPS erreicht werden kann, wohingegen das CFW deutlich bessere Materialeigenschaften als EPS und XPS erreicht. Zudem ist zu beachten, dass das CFW am Ende seiner Nutzungsdauer ggf. kostenfrei durch den Hersteller wieder zurückgenommen wird und dass die zum Teil sehr hohen Entsorgungskosten der „Einweg“-Materialien nicht in der Betrachtung berücksichtigt wurden.

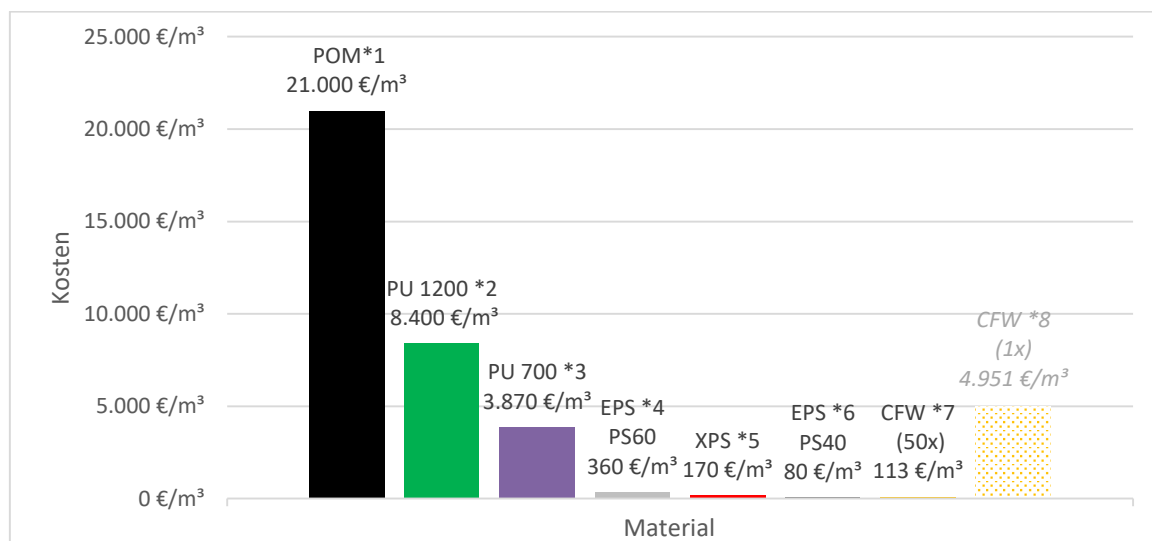


Abbildung 4-42: Materialbruttokostenansätze für CNC gefräste Schalungen im Vergleich: \*1 POM – Polyoxymethylen (W. Max Wirth GmbH), \*2\*3 PU – Polyurethan, Dichte 1200 / 700 kg/m<sup>3</sup> (OBO-Werke GmbH), \*4 EPS PS60, Dichte 60 kg/m<sup>3</sup> (Metz EPS), \*5 XPS – Extrudierter Polystyrol-Hartschaum, Dichte 40 kg/m<sup>3</sup> (OBI), \*6 EPS PS40, Dichte 40 kg/m<sup>3</sup> (Schurg GmbH), \*7 CFW bei 50-facher Wiederverwendung ( $WAX_{jE50}$ ), \*8 CFW, reine Materialkosten ( $WAX_{inv}$ )



Damit CFW nach Gl. (1) z. B. mit dem für die individuelle Herstellung von Betonfertigteilen in Form von Schachtunterteilen für Schmutz- und Abwasserkanäle (vergl. 2.3.3) verwendeten „Einweg“-Schalungsmaterial EPS PS40 konkurrieren kann, ist eine Wiederverwendungsrate ( $WAX_{wvr}$ ) von min. 75 Zyklen notwendig, um die Nutzenschwelle (engl. break-even point) zu überschreiten.

Obwohl dieses bisher nicht explizit untersucht wurde, wird erwartet, dass bei sachgerechtem Umgang mit dem CFW (u. a. maximale Erwärmung auf 100°C) diese 75-fache oder sogar höhere Wiederverwendungsraten erreicht werden können, ohne dass sich seine physikalisch-mechanischen Eigenschaften ändern. Zudem wird erwartet, dass nach zukünftigen Untersuchungen durch den Einsatz von Füllstoffen nicht nur die physikalisch-mechanischen Eigenschaften verbessert werden (vergl. 3.4), sondern ebenfalls die Materialbruttokosten ( $WAX_{inv}$ ) reduziert werden können. Könnten z. B. nur etwa 20 % des Wachses durch Rohzellulose (Materialbruttokosten etwa 500 €/m<sup>3</sup>) substituiert werden, könnten die Materialbruttokosten ( $WAX_{inv}$ ) um etwa 18 % (900 €/m<sup>3</sup>) und damit einhergehend ebenfalls die Schmelzenergiekosten gesenkt werden.

#### 4.4.2 Wiederverwendung / Recycling von Wachs

Der enorme ökologische Vorteil der Non-Waste-Wachsschalung gegenüber „Einweg-Schalungstechniken“ liegt in der Vermeidung von Abfall und der erzeugten Nachhaltigkeit, die in der sehr hohen Wiederverwendbarkeit des Wachses begründet liegt. Die Nachhaltigkeit und damit einhergehende Wirtschaftlichkeit entsteht natürlich nur, wenn ein hoher Anteil und die Qualität des Wachses in einem sogenannten „Closed Loop Recycling“ Prozess, also einem geschlossenen Recyclingsystem-Kreislauf, durch Wiedereinschmelzen des Wachses gehalten werden kann. Um dieses zu erreichen, sollten bei den beiden Stoffströmen und dem Einschmelzen selbst folgende Punkte beachtet werden:

##### a) Wachs-Späne aus dem Fräsvorgang

Bei einer geeigneten Auslegung des Fräsplatzes und der Verwendung von gereinigter Druckluft zur Kühlung kann davon ausgegangen werden, dass das Wachs nicht verunreinigt wird und die Wachsspäne mit einer 100%igen Recyclingquote wieder eingeschmolzen werden können.

##### b) Wachsschalung nach dem Ausschalen

Obwohl bei sachgerechtem Umgang mit den Wachsschalungen ebenfalls von einer 100%igen Recyclingquote bzw. Rückführung zum Wiedereinschmelzen ausgegangen werden kann, besteht bei diesem Stoffstrom das Risiko, dass die Qualität bzw. Reinheit des Wachses durch verschiedene Einflüsse negativ beeinflusst wird.

Zum einen kommt das Wachs mit Beton in Kontakt, wird durch Dritte transportiert und ggf. auf einer Baustelle montiert, wodurch es z. B. mit mineralischen Stoffen wie Betonresten (führt zu einer stärkeren Abnutzung des Fräasers) oder organischen Stoffen wie Holzresten verunreinigt wird. Trotz Reinigung der Wachsschalung nach dem Betonieren traten bei den durchgeführten Versuchen diese Verunreinigungen des Wachses auf, diese ließen sich aber ohne weiteres aus dem geschmolzenen Wachs wieder entfernen. Schwere Stoffe wie grobe Betonreste setzten sich am Boden des Schmelzkessels ab und leichtere Stoffe wie Holz schwammen an der Oberfläche des flüssigen Wachses auf und konnten so abgeschieden werden. Alle weiteren feinen Verunreinigungen konnten, in Analogie zum industriellen Wiedereinschmelzen von Kerzenresten, durch feine, temperaturbeständige Filter aus dem flüssigen Wachs abgeschieden werden.

Zum anderen kommt das Wachs mit chemischen Substanzen wie Trennmitteln und anderen, ggf. bei niedrigeren Temperaturen schmelzenden Substanzen in Verbindung, die für das Recycling ein größeres Problem darstellen, da sie durch reines mechanisches Filtern aus dem flüssigen Wachs nicht abgeschieden werden können. Da das Aufbringen von Trennmitteln auf die Wachsschalungen für das spätere Ausschalen unerlässlich ist, sollte:

- kein ölhaltiges Trennmittel verwendet werden, da Wachs lipophil ist und mit Öl eine chemische und physikalische Reaktion eingeht,
- nach dem Ausschalen versucht werden, das Trennmittel wieder von der Wachsschalung zu entfernen,
- nur so viel wie nötig und so wenig wie möglich Trennmittel aufgetragen werden, um die chemische Verunreinigung des Wachses auf ein Minimum zu reduzieren.

Vor der Verunreinigung durch andere, bei niedrigeren Temperaturen schmelzende Substanzen wie z. B. Schmierfetten oder thermoplastischen Kunststoffen ist die Wachsschalung zu schützen oder vor dem Recycling davon möglichst zu reinigen.

##### c) Einschmelzen

Um das Wachs während des Einschmelzens vor einer übermäßigen Oxidation und somit dauerhaften Änderung der Eigenschaften zu schützen, sollten Wachse grundlegend nicht weiter als +10 K (maximal +20 K) über ihren jeweiligen Tropfpunkt erhitzt werden. Bei CFW sollte daher, wie in den Versuchen berücksichtigt, die maximale Temperatur der Schmelze auf 100°C begrenzt werden.

Ebenfalls sollte kein feuchtes Wachs (z. B. nasse Späne) direkt eingeschmolzen werden, da dies problematisch und teilweise sogar gefährlich ist. Heißes geschmolzenes Wachs besitzt eine geringere Dichte als Wasser und schwimmt daher oben. Erreicht das Wasser beim Erhitzen seinen Siedepunkt bei 100°C, entsteht unter einer deutlichen Volumenvergrößerung aufsteigender Wasserdampf unter dem Wachs und es kommt zum Spritzen des heißen Wachses aus dem Schmelzkessel (unter starken Knallgeräuschen), ähnlich wie bei Wasser in einer heißen Pfanne mit Öl. Wird dieses Wasser-/Wachsgemisch in eine Gussform, z. B. zur Erstellung von Wachstafeln, gegeben, entstehen zudem am Grund der Wachstafeln beim Abkühlen durch das sich dort ansammelnde Wasser Lunker und Poren, sodass die Wachstafel für die Herstellung von Wachsböcken teilweise unbrauchbar wird.

Unter Beachtung dieser Hinweise konnten, wie u. a. durch das IWF bestätigt, abgesehen von einer leichten Oxydation des Wachses (Eindunkeln), selbst nach einer etwa 50-fachen Wiederverwendung keine Änderungen der Wachseigenschaften festgestellt werden.

#### 4.4.3 Toxikologie und Sicherheit des CFW Wachses

Gemäß Sicherheitsdatenblatt ist CFW nicht gesundheitsgefährdend / toxikologisch und braucht nach der Richtlinie 67/548/EWG bzw. 1999/45/EG sowie nach der EG/1272/2008 nicht gekennzeichnet zu werden. Als Sicherheitshinweis bei der thermischen Verarbeitung (Schmelzen) wird empfohlen, geeignete Schutzkleidung gegen Verbrennungen durch heißes Wachs bei dessen Handhabung zu tragen und zudem für Absaugung der Dämpfe und eine ausreichende Lüftung zu sorgen. Das Wachs ist bei der thermischen Verarbeitung nicht über den Flammpunkt von 120°C zu erhitzen.

Obwohl CFW bei 20°C im Fräsvorgang prinzipiell grobe Späne erzeugt, ist nicht auszuschließen, dass bei kälteren Temperaturen oder bei der Verwendung von alternativen Fräsern sehr feine, pulverförmige Späne entstehen, die ein Aerosol oder Nebel bilden können. In diesem Fall ist die Zerspanung in einem abgeschlossenen Raum unter Absaugung durchzuführen oder eine Atemmaske mit Filtertyp A2, A2/P2 oder ABEK zu tragen. Zudem sind Zündquellen aufgrund einer möglichen Staubexplosion vom Aerosol oder Nebel fernzuhalten.

Vor dem Arbeiten mit Wachs sollten unbedingt das entsprechende Sicherheitsdatenblatt gelesen und die Empfehlungen und Hinweise beachtet werden!

## 4.5 Anwendungsbeispiele für die Wachsschalungen

### 4.5.1 Herstellung eines Beton-Fertigteilbalkons

Beton-Fertigteilbalkone erscheinen in geometrischer Hinsicht relativ simpel, bei ihrer Herstellung ist der Anteil der Schalungskosten an den gesamten Herstellungskosten dennoch sehr hoch. Dieses liegt einerseits daran, dass ihre Außenabmessungen aufgrund der wechselnden Gebäudekubaturen stark variieren und daher mit einer Schalung nur Unikate (Losgröße 1) oder maximal Kleinserien in Beton gegossen werden können. Andererseits stellen die unter dem Bodenbelag im Balkon integrierten unterschiedlichen Regenwasserablaufgefälle hohe Anforderungen an die Einhaltung exakter Neigungen und der Oberflächenebenheit.

Um diese hohen Anforderungen zu erfüllen und dabei möglichst wirtschaftlich zu bleiben, werden die Schalungen, wie in Abbildung 4-43 dargestellt, bei der Firma HIEBER Betonfertigteilterwerk GmbH in Wörleschwang [149] momentan von erfahrenen Tischlern in einem manuellen Prozess aus beschichteten Multiplexplatten hergestellt. Besonders die exakte Einhaltung der diversen Neigungswinkel des Innenkerns und das nachträgliche Spachteln und Schleifen der Schalung ist dabei sehr anspruchsvoll und arbeitsintensiv.

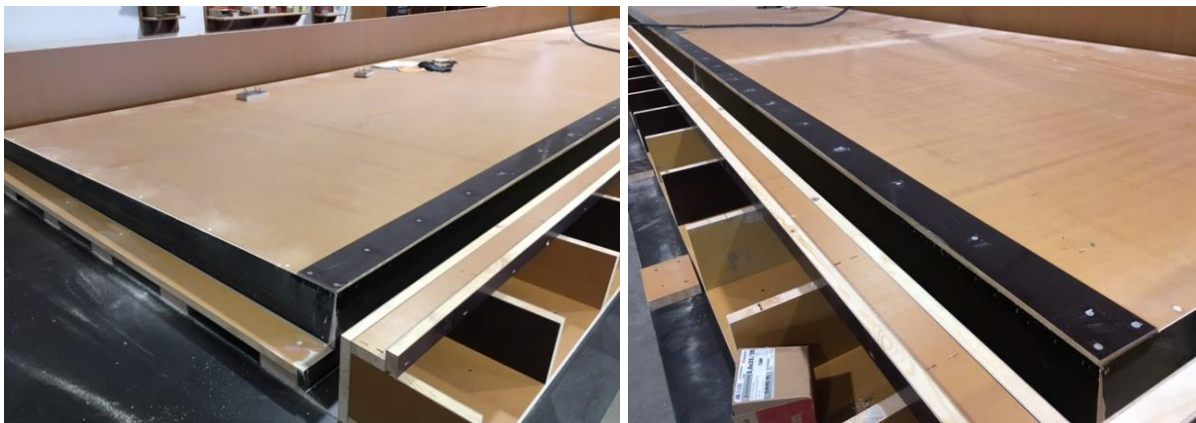


Abbildung 4-43: Konventionelle Herstellung von Schalungen für Beton-Fertigteilbalkone aus beschichteten Multiplexplatten bei der Firma HIEBER Betonfertigteilterwerk GmbH

Da sich besonders der komplexe Innenkern der Balkonschalung für die Anwendung der entwickelten Non-Waste-Wachsschalungstechnologie eignet, wurde in Kooperation mit der Firma HIEBER Betonfertigteilterwerk GmbH in einem durchgeführten Anwendungsbeispiel die Praxistauglichkeit der Wachsschalungen zur Herstellung eines Muster-Fertigteilbalkons überprüft. Zur Vereinfachung des Transportaufwandes wurden die Seitenabmessungen des Balkons auf 1000 x 700 mm begrenzt, die Standardhöhe von 300 mm aber beibehalten. Obwohl die Geometrie des Schalungskerns aufgrund seiner unter verschiedenen Winkeln geneigten Flächen (Abbildung 4-44, rechts) für eine manuelle Herstellung aus Plattenelementen sehr komplex ist, kann die Geometrie mithilfe einer fünfachsigigen Fräse aus einem Vollblock relativ einfach durch entsprechende Neigung der fünften Achse hergestellt werden. Hierdurch und durch die Ebenheit der Flächen können ebenfalls Fräser mit großem Durchmesser verwendet werden, die äußerst kurze Bearbeitungszeiten zulassen.

Um den kompletten Prozess von der Planung bis zur Herstellung abzubilden, wurde dem ITE von Hieber ein digitales 3D CAD Modell des herzustellenden Balkons (Abbildung 4-44, links) übergeben. Basierend auf diesem Modell wurde über die Funktion der „Booleschen Differenz“ im CAD Programm Rhino der Firma McNeel mittels Subtraktion von einem Volumenkörper das entsprechende Negativ als digitales 3D CAD Schalungsmodell erzeugt.

Basierend auf den Maximalabmessungen des herzustellenden Schalungselements wurde ein Wachsblock als Rohling durch das Vergießen von Wachstafeln (vergl. 4.1.1.5) mit den Abmessungen 1150 x 705 x 150 mm hergestellt (Volumen: 122 Liter). Als Frässtrategie wurde festgelegt, den Schrumpfvorgang mit einem Aufmaß von 2 cm durchzuführen und anschließend alle Flächen in der

Reihenfolge von oben nach unten in einzelnen Schlichtgängen zu bearbeiten (vergl. 4.2.4). Als Fräser für das Schruppen und Schlichten der horizontalen Flächen wurde ein Walzenstirnfräser W ( $\varnothing = 80$  mm, Anzahl Schneiden  $z = 4$ , Schneidenlänge  $L_s = 45$  mm, Drallwinkel  $40^\circ$ ) und für das Schlichten der vertikalen Flächen ein Schafffräser W d25 /  $L_s 90$  mm ( $\varnothing = 25$  mm, Anzahl Schneiden  $z = 3$ , Schneidenlänge  $L_s = 90$  mm, Drallwinkel  $42^\circ$ ) verwendet.

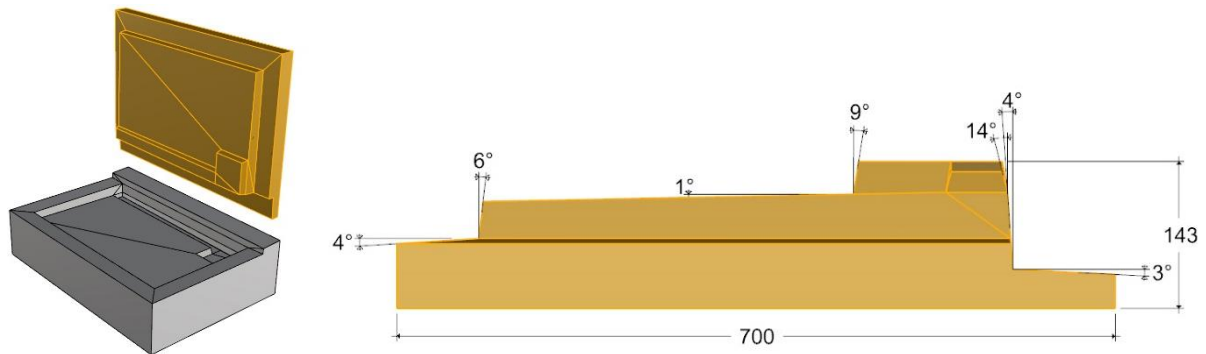


Abbildung 4-44: grau: digitales 3D Modell des Muster-Fertigteilbalkons und gelb: mittels der Funktion Boolesche Differenz im CAD Programm Rhino der Firma McNeel erzeugtes digitales 3D CAD Schalungsmodell (links), Seitenansicht des Schalungsmodells unter Angabe einer Auswahl relevanter Neigungswinkel und Maße in mm (rechts)

Auf Basis der Frässtrategie, Fräserauswahl und Fräsparameter wurde mithilfe der CAD/CAM Software EasySTONE der Firma DDX die Fräsbahnplanung erstellt (Abbildung 4-45, links) und der NC Code für die Fräse berechnet. Für die Bearbeitung des Wachssrohlings wurde die Fünffachsfräse des Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) am ITE verwendet. Der gesamte Fräsvorgang dauerte 43 Minuten und das Ergebnis ist in Abbildung 4-45, rechts dargestellt. Basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4.2 wurden folgende Bearbeitungsparameter gewählt:

1. Walzenstirnfräser Schruppen:  $n = 5000$  1/min,  $v_f = 6$  m/min,  $a_p = 30$  mm,  $a_e = 80$  mm
2. Walzenstirnfräser Schlichten:  $n = 5000$  1/min,  $v_f = 5$  m/min,  $a_p = 10$  mm,  $a_e = 30$  mm
3. Schafffräser Schlichten:  $n = 8000$  1/min,  $v_f = 5$  m/min,  $a_p = 10$  mm,  $a_e = 10$  mm
4. Einzahnfräser  $d = 10$  mm /  $h = 25$  mm für Bohrung  $n = 8000$  1/min,  $v_f = 0,5$  m/min,  $a_p = 10$  mm (Tauchen),  $a_e = 10$  mm

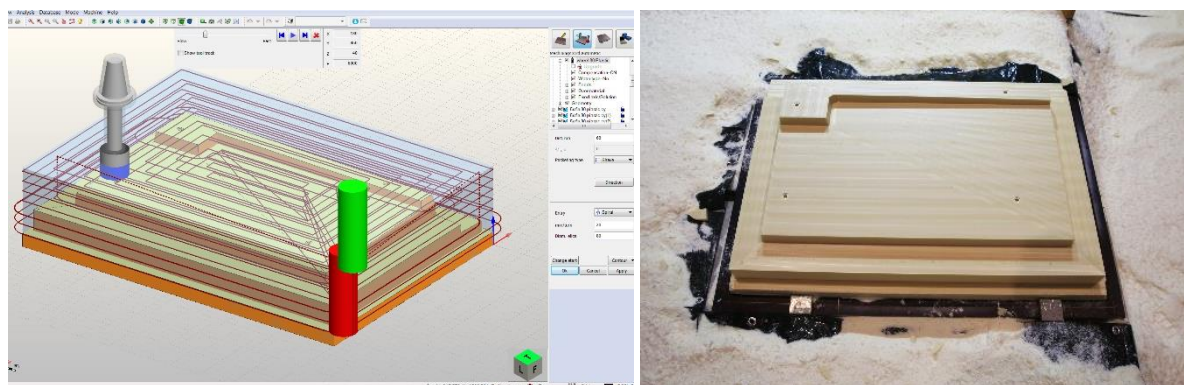


Abbildung 4-45: Fräsbahnplanung (links), fertiges, mit dem DBFL des ITE gefrästes Wachs-Schalungselement aus ConFormWax (rechts)

Nach dem Anbringen der Randabschalung und des Bewehrungskorbes wurde der Standardbeton der Firma Hieber (C 30/37; CEM II/A-LL42,5 300 kg/m<sup>3</sup>, w/z 0,6; Sand 0/4 764 kg/m<sup>3</sup>; Kies 8/16 1112 kg/m<sup>3</sup>) in die Schalung eingebracht (Abbildung 4-46, links) und mittels Innenrüttler verdichtet. In Analogie zum Fertigteilwerk wurde 17 Stunden nach der Betonage ausgeschalt (Abbildung 4-46, rechts). Um die Adhäsionskräfte zwischen Wachsschalung und Betonbauteil zu verringern und das Ausschalen zu erleichtern, wurde die in Kapitel 4.1.2.2 beschriebene Ausschalhilfe angewendet. Wie in Abbildung 4-47, links beispielhaft zu sehen ist, blieb die Wachsschalung dabei komplett unbeschadet und kann für einen weiteren Abguss des Balkons problemlos wiederverwendet werden. In technischer Hinsicht erfüllt der



fertige Balkon die gestellten Anforderungen an Betonoberflächenqualität und Maßhaltigkeit, und im Besonderen dabei die für den Wasserablauf im Inneren erforderlichen ebenen und exakt unter verschiedenen Winkeln geneigten Flächen.

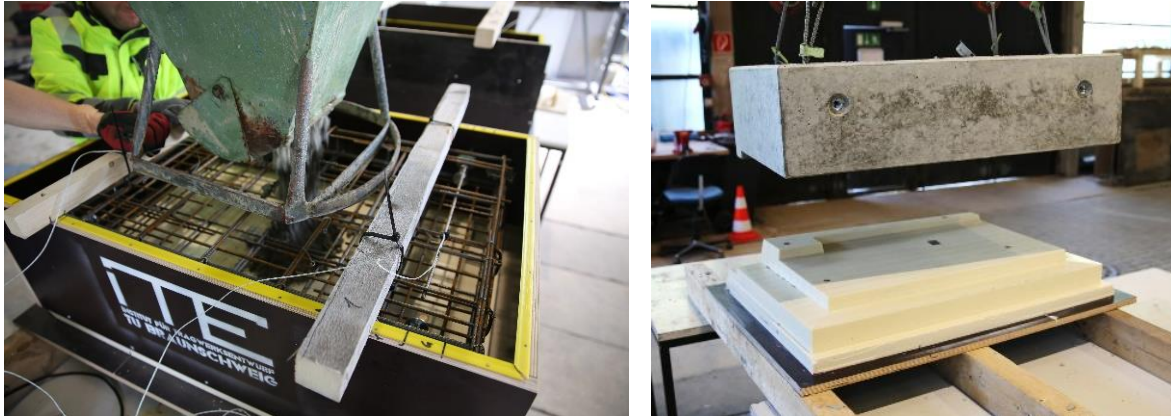


Abbildung 4-46: Betonierung des mit einer Randabschalung und einem Bewehrungskorb versehenen Wachs-Schalungselements (links), Abheben des betonierten Muster-Fertigteilbalkons (rechts)



Abbildung 4-47: unbeschädigtes Wachs-Schalungselement nach dem Ausschalen (links), Muster-Fertigteilbalkon (rechts)

### Ökonomischer Vergleich der Schalungskosten

Im Vergleich der Schalungskosten (Tabelle 18) zwischen der konventionellen manuellen Herstellung durch einen Tischler mit der hier prototypenhaft angewendeten Non-Waste-Wachsschalung zeigt sich am hier vorliegenden Anwendungsbeispiel des Muster-Fertigteilbalkons Folgendes: Bei der vorausgesetzten Mindestwiederverwendungsrate des Wachses von 50 Zyklen sind die Material- und Entsorgungskosten deutlich geringer. Ebenfalls liegen die Kosten für das Fräsen und die Fräsbahnplanung deutlich unter denen des Tischlers, obwohl noch deutlich größere und somit effizientere Fräser einsetzbar gewesen wären. Aufwendig und damit kostentreibend sind bei der Anwendung der Non-Waste-Wachsschalung hingegen aktuell noch die Wachsblockherstellung, die Fräsvorbereitung und das Reinigen der Fräse, was sich auf eine fehlende Routine und Automatisierung zurückführen lässt.

Besonders durch eine technische Optimierung dieser Prozessschritte, z. B. der Blockherstellung (siehe Vorschläge in 4.1.1) und dem Frässpanmanagement (Absaugung, welche die Wachsspäne direkt in einen Schmelzkessel zurückführt), könnte die Non-Waste-Wachsschalung auch in ökonomischer Hinsicht für die Herstellung von Schalungen für Beton-Fertigteilbalkone konkurrenzfähig angewendet werden.



#### 4. Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie

Tabelle 18: Kostenvergleich für die reine Schalungsherstellung am Beispiel des Muster-Fertigteilbalkons (netto)

Position	Konventionelle Herstellung	Non-Waste-Wachsschalung
Materialkosten	Holz: 55 €	<b>122L CFW *0,11 €/l: 13 €</b>
	Sonst.: 40 €	Holz: 10 €
Arbeitszeit / Maschine	Manuelle Arbeit Tischler	Blockherstellung 5 Std à 23€/h 115 €
	ca. 5 Std à 23€/h 115 €	<b>Fräsbahnplanung 1 Std à 23€/h 23 €</b>
		Vorbereitung 2 Std à 23€/h 46 €
		<b>Fräsen 43 min à 70 €/Betriebs h 50 €</b>
		Reinigen / Montage 2 Std à 23€/h 46 €
Entsorgung	Entsorg. 1 Std: 23 € Holz ca. 20 €	keine, da Schmelzkosten in Materialkosten des Wachses enthalten
<b>Gesamt</b>	<b>253 €</b>	<b>303 €</b>

#### Thermische Risiken

Da das „thermische Risiko“, also die Übertragung der Hydratationswärme des Betons auf die Wachsschalung und die daraus ggf. resultierende Festigkeitsabnahme des Wachses, als größtes auszuschließendes Risiko angesehen wurde, wurde zusätzlich zum ersten noch ein identischer zweiter, mit Temperaturmessfühlern versehener Balkon mit einer baugleichen Wachsschalung hergestellt. Wie am gemessenen Temperaturverlauf in Abbildung 4-48 zu sehen ist, wurde der Beton mit einer Temperatur von 17°C in die 15°C warme Schalung eingebracht. Nach 17 Std., also nahezu exakt zu dem Zeitpunkt, an welchem der erste Balkon ausgeschalt wurde, erreicht die Hydratationstemperatur mit 30°C im Kern des Betons ihr Maximum. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit und der hohen Wärmekapazität des Wachses ist die gemessene Temperaturerhöhung im Wachs zeitversetzt und abgeschwächt zu der des Betons, wobei dieser Effekt über die Tiefe zunimmt. Obwohl die Hallentemperatur diesen Effekt natürlich unterstützt, ist auf Grundlage der Messergebnisse nicht davon auszugehen, dass auch bei höheren Außentemperaturen die Hydratationswärme die Wachsschalung derart durchwärmen würde, dass das Wachs seinen thermischen Gebrauchsbereich überschreitet und eine nicht mehr ausreichende Festigkeit aufweist.

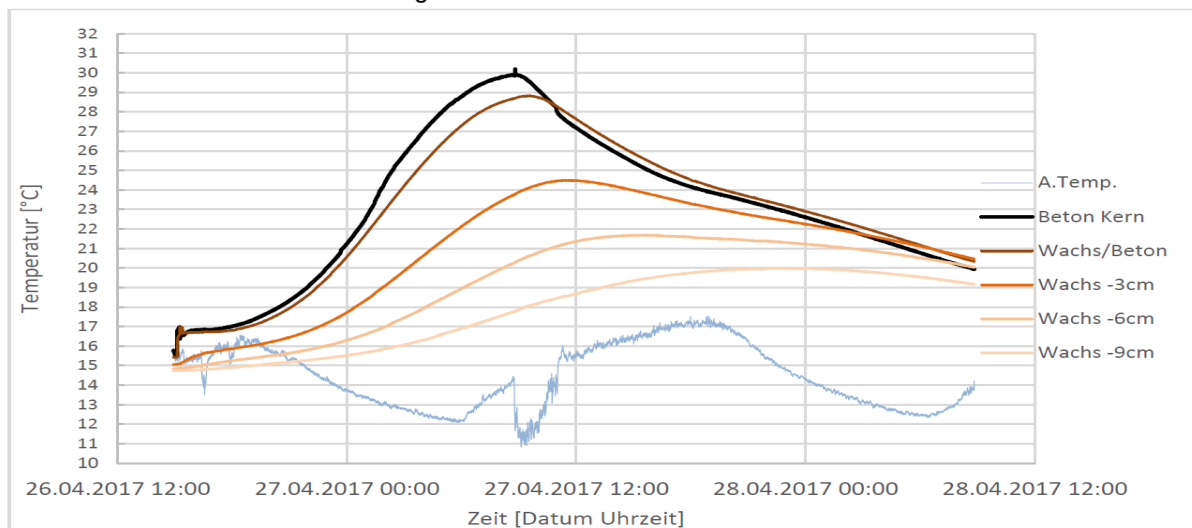


Abbildung 4-48: Gemessener Temperaturverlauf (T) am zusätzlichen baugleichen Referenz-Musterbalkon, welcher erst nach 42 Std. ausgeschalt wurde; schwarz: T gemittelt aus zwei Punkten im Kern des Balkons; braun: T an der Grenzschicht zwischen Wachsschalung und Beton; orange: T in der Wachsschalung jeweils 3, 6 und 9 cm unterhalb der Grenzschicht; hellblau: T in der Versuchshalle

### Fazit des Anwendungsbeispiels Beton-Fertigteilbalkon

Der aus technischer Sicht überaus gelungene Muster-Fertigteilbalkon hat die Erwartungen aller Beteiligten positiv übertroffen. Im Vergleich zum manuellen tischlermäßigen Schalungsbau zeigt die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie an diesem Anwendungsbeispiel anschaulich, dass sich mit ihr prinzipiell schneller präzisere und formtreuere Schalungen und somit Balkone herstellen lassen. Auch wenn die Technologie aktuell noch sehr komplex in der Anwendung ist, könnte sie durch weitere Entwicklungen und Automatisierungen der einzelnen Prozessschritte auch aus ökonomischer Sicht den „break-even point“ erreichen und konkurrenzfähig eingesetzt werden.

#### 4.5.2 Herstellung eines Schacht-Unterteils für Abwasserleitungen

Im Rahmen des derzeit am ITE gemeinsam mit dem Industriepartner B+S Engineering aus Rheine [143] durchgeführten Forschungsprojektes „Entwicklung eines modularen und vollautomatischen Produktionsverfahrens für Freiformbetonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen“ soll als Ersatz für das bisher zur Herstellung von Schalungen für monolithische Abwasser-Schachtunterteile eingesetzte EPS PS40 (vergl. 2.3.3) gepresstes CFW (vergl. 4.1.1.6) verwendet werden. Um die prinzipielle Verwendbarkeit von CFW für diese Art von Schalungskörpern zu überprüfen, wurde als zweites Anwendungsbeispiel aus einem CFW Wachsblock (vergl. 4.1.1.5) ein solcher Schalungskörper im Maßstab 1:2 herausgefräst.

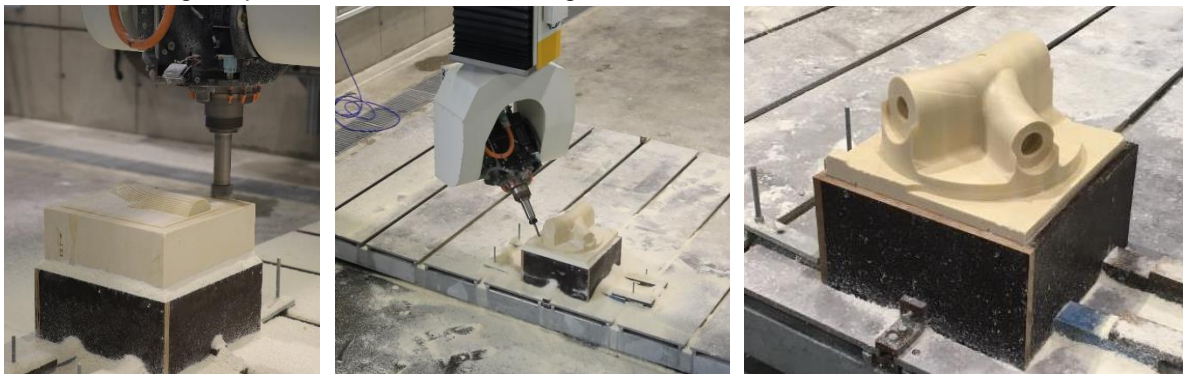


Abbildung 4-49: Herstellung eines Schalungskörpers aus CFW für monolithische Abwasser-Schachtunterteile aus Beton am DBFL Großgerät – „Digital Building Fabrication Laboratory“ des ITE: Schruffräsen des Wachsblocks (links), Schlichtfräsen des Wachsblocks (Mitte), fertiger CFW Schalkörper (rechts)

Nach Aufstecken der System-Rohranschlussschalungen an den CFW Schalkörper (Abbildung 4-50, links) wurde dieser in eine zylindrische Systemschalung eingebaut und mit UHPC abgegossen (Abbildung 4-50, rechts).



Abbildung 4-50: In Systemschalung mit System-Rohranschlussschalungen für Abwasser-Schachtunterteile eingebauter CFW Schalkörper (links), Füllen der Schalung mit UHPC (rechts)

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt anhand des aus UHPC hergestellten Abwasser-Schachtunterteiles (Abbildung 4-51, links), dass mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie solche zwar profan wirkenden, doch aufgrund ihrer diversen Gerinneneigungen und Krümmungen äußerst komplexen Bauteile vollkommen abfallfrei hergestellt werden können. Durch Einsatz einer Ausschalhilfe (vergl. 4.1.2.2) blieb der CFW Schalkörper (Abbildung 4-51, links) zudem völlig unversehrt und sauber und könnte so für einen weiteren Abguss wiederverwendet oder dem Recycling zugeführt werden.



Abbildung 4-51: Hergestelltes Abwasser-Schachtunterteil aus UHPC nach dem Ausschalen mit Druckluft (links), unversehrter CFW Schalkörper nach dem Ausschalen (rechts)

##### 4.5.3 Herstellung des UNI-CON<sup>2</sup> Demonstrators (Stützenkopfschalung)

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms (SPP) 1542 „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft“ wurde durch die drei am SPP 1542 beteiligten Institute – dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz iBMB, dem Institut für Tragwerksentwurf ITE und dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik IWF der Technischen Universität Braunschweig – ein Demonstrationsobjekt mit der Bezeichnung UNI-CON<sup>2</sup> (Universal Concrete Construction) entworfen (Abbildung 4-52, links) und hergestellt (Abbildung 4-52, rechts).



Abbildung 4-52: CAD Visualisierung des Demonstrators UNI-CON<sup>2</sup> (links), fertig hergestellter Demonstrator UNI-CON<sup>2</sup> (rechts)



In den Entwurf und die Ausführung des UNI-CON<sup>2</sup> flossen dabei zahlreiche innovative Forschungsergebnisse der beteiligten Institute aus beiden Antragsphasen des SPP 1542 ein. U. a. wurde für die Schalung der freigeformten Bauteile des Stützenkopfes die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie angewendet, wodurch der Demonstrator ohne den sonst üblichen Schalungsabfall nachhaltig hergestellt werden konnte. Basierend auf dem digitalen CAD Modell des Demonstrators wurde mittels der Funktion Boolesche Differenz im CAD Programm Rhino der Firma McNeel die Schalung erzeugt und zur späteren Ausschaltbarkeit in Viertel geteilt (Abbildung 4-53, links). Um die einzelnen Wachsschalungsmodule aus CFW exakt aneinander fügen zu können, wurde ein kegelstumpfförmiges Nut- und Federsystem im digitalen Modell integriert. Die einzelnen Wachsschalungsmodule wurden am IWF (Abbildung 4-53, rechts) aus am ITE gegossenen Wachsböcken (vergl. 4.1.1.5) gefräst, am IBMB zusammengefügt (Abbildung 4-54, links) und mit UHPC ausgegossen. Nach dem problemlosen Ausschalen (Abbildung 4-54, unten) wurden die unversehrten Wachsschalungen gereinigt und für die Herstellung des Stützenfußes wiederverwendet. Wie ursprünglich geplant, soll der UNI-CON<sup>2</sup> zukünftig auf dem Campus der Technischen Universität Braunschweig ausgestellt werden.

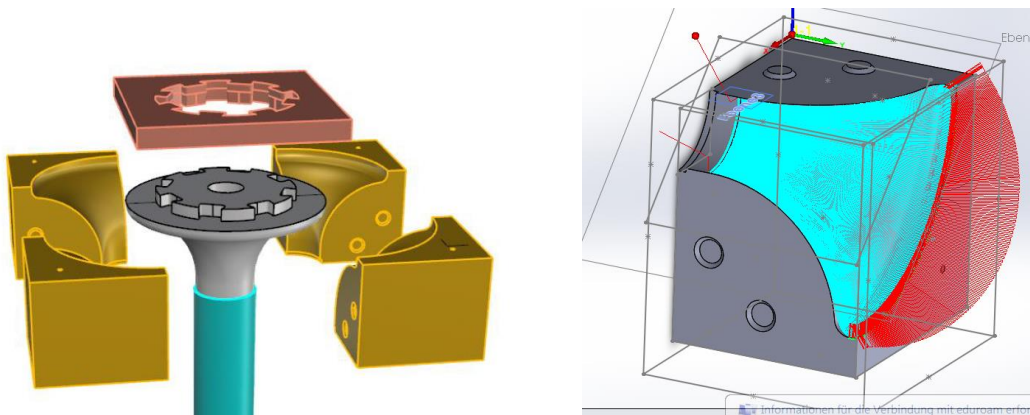


Abbildung 4-53: Digitales 3D Modell des Stützenkopfes, dabei in Gelb: mittels der Funktion Boolesche Differenz im CAD Programm Rhino der Firma McNeel erzeugtes digitales 3D CAD Schalungsmodell (links), Fräsbahnplanung am IWF für die Herstellung der CFW Wachsschalungen (rechts)

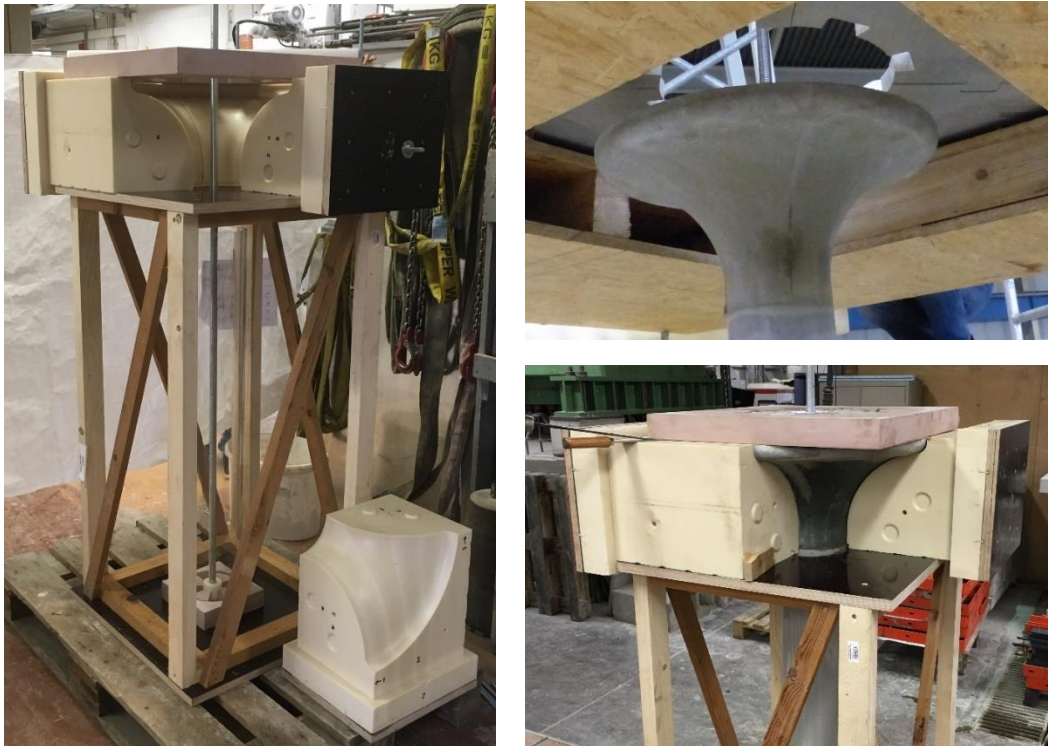


Abbildung 4-54: CFW Wachsschalungsmodule des Stützenkopfes beim Zusammenbau am IBMB (links), Ausschalen des Stützenkopfes (unten), Fügen des Stützenkopfes mit den Deckenplatten mittels hochpräziser Trockenfügungen [62] (oben)

## 4.6 Hohlraum-Wachsschalungen

### 4.6.1 Hohlraum-Wachsschalungen als Ergänzung zu den Außen-Wachsschalungen

Die erforschte Non-Waste-Wachsschalungstechnologie eignet sich prinzipiell nicht nur dazu, geometrisch komplexe und präzise Außen-Wachsschalungen herzustellen, sondern auch zur Herstellung von geometrisch komplexen Verdrängungskörpern (Hohlraum-Wachsschalungen), um nicht nur eine strukturell optimierte äußere, sondern nach dem Ausschmelzen des Wachses auch eine massenreduzierte innere Form zu erhalten. Abbildung 4-55 zeigt schematisch den ergänzten Prozessablauf (vergl. 1.3) für die Herstellung von innen hohlen Betonbauteilen durch integrierte Verdrängungskörper aus Wachs.

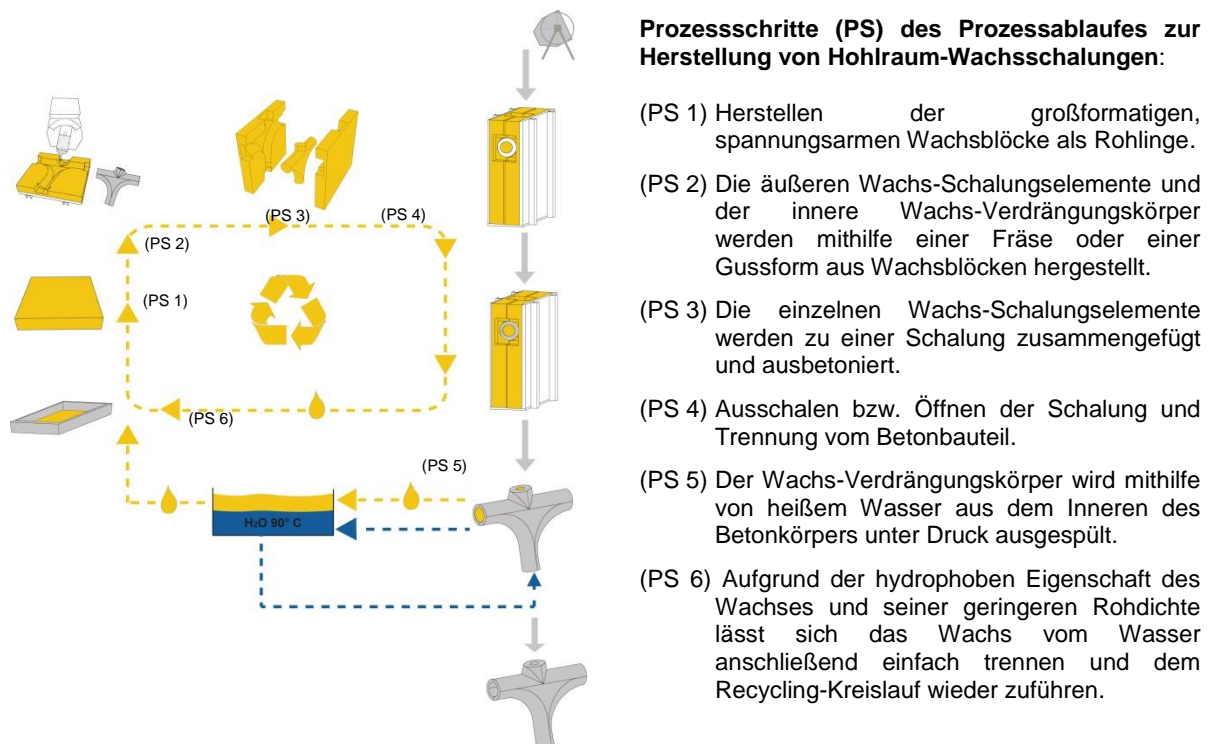


Abbildung 4-55: Prinzip des Prozessablaufes für die Herstellung von (dünnwandigen, hohlen) Betonbauteilen mithilfe von Verdrängungskörpern (Hohlraum-Wachsschalungen) aus Wachs (gelb)

### 4.6.2 Bestehende Hohlraum-Schalungstechniken

Gemäß dem biologischen Grundprinzip, wie es zum Beispiel im Knochenbau der Vögel zu finden ist (Abbildung 4-56, 1. v. l.), wird auch im Betonbau versucht, nicht tragendes Material durch Einbringen von Hohlkörpern zu verdrängen. Mit den derzeit gängigsten Verfahren der Firma Cobiax [150] oder Beeplate [151], welche auf der Verwendung von pneumatisch aufgeblasenen Kunststoffkugeln basieren (Abbildung 4-56, 2. v. l. + 3. v. l.), lassen sich Material- und Gewichtseinsparungen von bis zu 35 % erreichen [150]. Mit dem pneumatischen Aufblasverfahren können wirtschaftlich nur einfache Geometrien wie Kugeln, Zylinder oder Rechteckformen als Verdrängungskörper hergestellt werden. Auch die Einsatzgebiete sind derzeit – wie in der Norm DIN EN 13747 [152] beschrieben – hauptsächlich auf den Bereich von Beton-Flachdecken begrenzt. Bei komplexeren Geometrien für poröse Betonbauteile und insbesondere bei geringer Stückzahl wie z. B. beim Phaeno in Wolfsburg (Abbildung 4-56, 4. v. l.) werden Verdrängungskörper aus CNC-gefrästem EPS hergestellt.





Abbildung 4-56: Hohle und damit leichte Knochen von Vögeln (1. v. l.), pneumatische kugelförmige Verdrängungskörper Cobiax Eco-Line (2. v. l.), abgeflachte rotationssymmetrische Verdrängungskörper Cobiax Slim-Line (3. v. l.) [150], Verdrängungskörper aus EPS im Phaeno Wolfsburg (4. v. l.)

Die Verdrängungskörper aus EPS oder anderen Kunststoffen bieten zwar die Möglichkeit, nahezu jede Hohlraumgeometrie zu erzeugen, dies ist aber mit dem Nachteil verbunden, dass die Formkörper dauerhaft im Bauteil verbleiben. Dies stellt einerseits einen Nachteil bei einem späteren Abbruch und Recycling dar und andererseits können im Brandfall nachteilige Auswirkungen wie z. B. zusätzliche Brandlasten entstehen.

#### 4.6.3 Potential von Hohlraum-Wachsschalungen

Aufgrund dieses Potentials und der Nachteile der bestehenden Systeme wurde in dem dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsvorhaben untersucht, wie durch die Anwendung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie geometrisch komplexe Verdrängungskörper (Hohlraum-Wachsschalungen) hergestellt, eingebaut und wieder aus dem Betonbauteil entfernt werden können. So kann nicht nur eine strukturell optimierte äußere, sondern auch eine massenreduzierte innere Form erreicht werden. Mittels CNC Frästechnologie können geometrisch komplexe Wachselemente hergestellt und als Hohlraumkörper in Betonteilen eingesetzt werden. Wegen der temperaturabhängigen Konsistenz der „Wachsverdrängungskörper“ können diese nach Erhärtung des Betons durch Ausschmelzen wieder entfernt und das Material vollständig wiederverwendet werden. So kann nicht nur das Eigengewicht der Betonbauteile deutlich reduziert werden, sondern die Bauteile sind dauerhaft sortenrein und die erzeugten Hohlräume könnten zudem dazu genutzt werden, unterschiedliche Medien – z. B. Spannstähle oder Leitungen für Strom, Wasser, Luft etc. – durch das Bauteil zu führen. Bei Verwendung von hochdichtem UHPC ist die Nutzung der Hohlräume sogar als unbeschichtetes Leitungsmedium für eine entsprechende Bauteilbeheizung oder -kühlung denkbar. Welches Potential die Anwendung von Verdrängungskörpern und ihre Optimierung bietet, zeigen die Forschungsarbeiten von Prof. Schnell, die für den Forschungspreis „Nachhaltige Entwicklung“ der Stiftung Deutscher Nachhaltigkeitspreis nominiert waren [153]. Durch nur leichte Anpassung der ursprünglich kugelförmigen Verdrängungskörper zu flacheren Elementen (Abbildung 4-56, 2. v. l. Eco-Line zu 3. v. l. Slim-Line) konnte in dem Forschungsprojekt der TU Kaiserslautern / Fa. Cobiax mit dem Titel „Ressourcenschonendes Leichtbauverfahren für Betondecken“ eine Material- und Gewichtseinsparung auch für dünne Betondecken erreicht werden [154]. Das Int.-Patent von Gardiner (vergl. 2.5.4) zeigt ebenfalls eindrucksvoll, welches enorme Potential der Einsatz von Wachs zur Herstellung von Hohlraum-Wachsschalungen besitzt.

#### 4.6.4 Bestimmung der Mindestprozessparameter

Voruntersuchungen am ITE haben gezeigt, dass die schnelle Erwärmung eines Betonbauteils von außen zum Ausschmelzen eines innenliegenden Waskerns zum Aufsprengen des Betonbauteils führen kann. Durch die bei der Festigkeitsentwicklung frei werdende Hydratationswärme erfolgt – wenn auch im geringeren Maße – eine ähnliche Erwärmung des Wachs-Verdrängungskörpers durch den umschließenden Beton. Um eine solche Sprengwirkung durch Erwärmung zu verhindern, muss die entstehende Temperaturdehnung des Wachses durch den umschließenden Beton bzw. UHPC in Form von Zugspannungen aufgenommen werden. Da es sich bei diesen Untersuchungen um Grundlagenforschung im Sinne einer Machbarkeitsstudie handelt, wurde in der hierzu durchgeführten ersten Versuchsreihe die notwendige Mindestbetondeckung für den als Referenz verwendeten UHPC Typ Nanodur im Bezug zu einem jeweils zylindrischen Wachs-Verdrängungskörper aus CFW mit einem

#### 4. Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie

Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 300 mm erforscht. Der verwendete Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 4-57, links dargestellt.

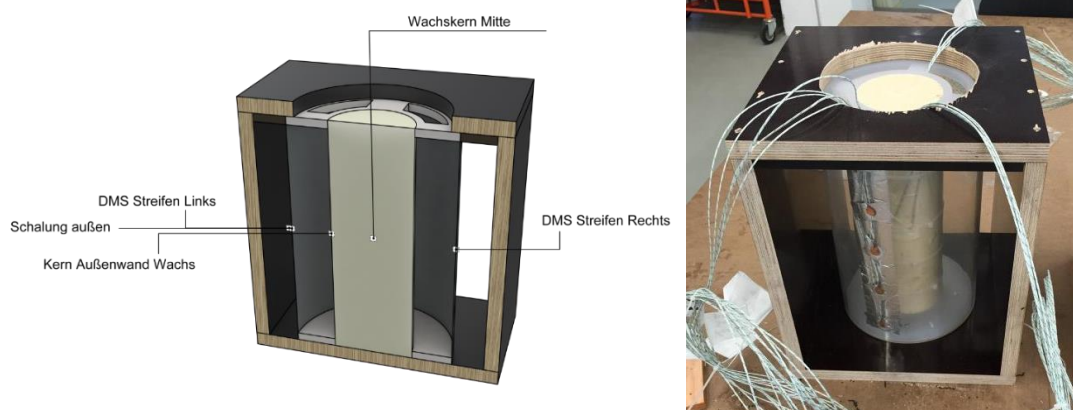


Abbildung 4-57: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Mindestbetondeckung über einem zylindrischen Wachs-Verdrängungskörper: schematische Darstellung und Positionsbeschreibung der Temperaturmesspunkte (links), hergestellte Versuchsschalung vor dem Einfüllen des UHPC und Anbringen der Dämmung (rechts)

Zur Simulation des wärmedämmenden Effektes einer Außen-Wachsschalung wurden die Versuchsschalungen (Abbildung 4-57, rechts) mit einer Dämmung (5-lagig gewickelt à 10 mm) versehen. Insgesamt wurden 6 Versuchsschalungen dieses Typs mit jeweils unterschiedlichen, in 20 mm abgestuften Außendurchmessern mit UHPC gefüllt und die Temperatur nach dem Betonieren an jeweils drei Messpunkten aufgezeichnet. Die in Tabelle 19 angegebenen Außendurchmesser ergeben somit z. B. bei 120 mm eine Wanddicke des UHPC Bauteils von 10 mm. Wie anhand der Werte in Tabelle 19 zu erkennen ist, nahm erwartungsgemäß die ermittelte maximale Temperatur mit zunehmender Betondeckung zu.

Tabelle 19: Maximale Temperaturen aller Messpunkte in den jeweiligen Versuchsschalungen (ermittelt über 68 Stunden nach dem Einfüllen)

Außen-durchmesser	220 mm	200 mm	180 mm	160 mm	140 mm	120 mm
Temp. Wachskern Mitte	44,7°C	42,8°C	40,3°C	36,6°C	31,8°C	26,2°C
Temp. Kernaußen-wand	46,5°C	44,3°C	41,7°C	37,6°C	32,6°C	26,6°C
Temp. Schalung außen	46,1°C	43,3°C	41,0°C	36,6°C	32,3°C	26,5°C

Beim Ausschalen wurde festgestellt, dass die UHPC Versuchskörper mit einem Außendurchmesser von 140 mm (Wanddicke 20 mm) und 160 mm (Wanddicke 30 mm) einen Riss über die komplette Länge aufweisen (Abbildung 4-58), wohingegen bei allen anderen Versuchskörpern keine Rissbildung vorzufinden war.



Abbildung 4-58: Gerissene UHPC Versuchskörper: Außendurchmesser 140 mm (links) und Außendurchmesser 160 mm (rechts)

Das Aufreißen der UHPC Versuchskörper mit den Außendurchmessern 140 mm und 160 mm lässt sich wahrscheinlich darauf zurückführen, dass diese anscheinend ein ungünstiges Verhältnis zwischen Hydratationstemperatur (Dehnung des Wachses) und abhängiger aufnehmbarer Zugspannungen aufweisen. Bei der Herstellung dünner Wandstärken aus UHPC sollte daher die Hydratationstemperaturentwicklung begrenzt oder ggf. der Wackskern gekühlt werden. Bei den als Referenz baugleich hergestellten sechs Versuchskörpern mit Feinkornbeton C30/37 (300 kg/m<sup>3</sup> Portlandzement PUR 4 N) waren die maximal gemessenen Temperaturen erwartungsgemäß deutlich geringer und alle Versuchskörper zeigten keine Rissbildung.

#### 4.6.5 Ausschmelzen der Verdrängungskörper aus Wachs

Da ein Ausschmelzen durch Erwärmen des Betonkörpers von außen nicht zielführend ist, sollte das Wachs von innen heraus ausgeschmolzen werden. Wie im Prinzip des Prozesszyklus (Abbildung 9-1) dargestellt, sollte dabei das Wachs mittels Wassers, welches über den Schmelzpunkt des Wachses erhitzt ist, ausgeschmolzen bzw. ausgespült werden. Der durch das heiße fließende Wasser sichergestellte, kontinuierliche Wachsabtrag schränkt die Ausdehnung der durch die Temperatur entstehenden Dehnung ein und vermindert so erheblich die Sprengwirkung (Abbildung 4-59) des Wachses. Da Wachs hydrophobe Eigenschaften besitzt, trennen sich Wachs und Wasser im Anschluss von selbst. In der zweiten Versuchsreihe wurde dieser Lösungsansatz für das Ausschmelzen mit Wasser (Abbildung 4-59, rechts) und der Wiedergewinnung des Wachses untersucht.

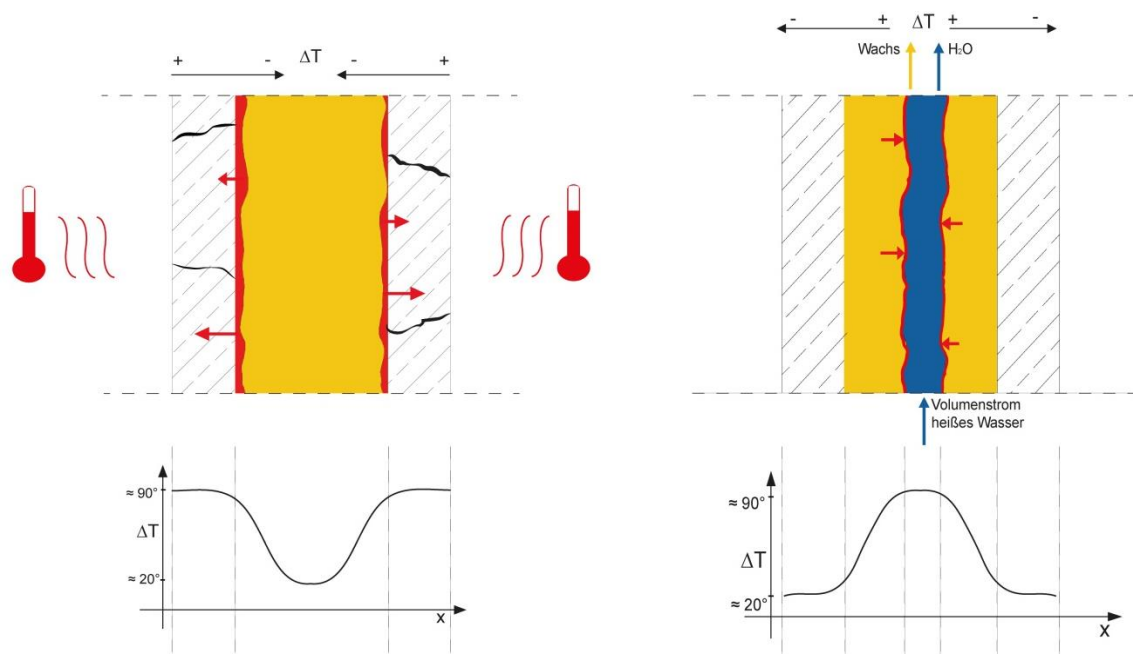


Abbildung 4-59: Schematische Darstellungen eines Ausschnitts: Sprengwirkung des Wachses im Kontinuum (gelb) bei Erwärmung des Betonkörpers von außen (links), Prinzip des Lösungsansatzes zum Abschmelzen des Wachses mit heißem Wasser (rechts); stark vereinfachte Darstellung des erwarteten Temperaturverlaufes über den jeweiligen Querschnitt (unten)

Grundlegende Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist die Sicherstellung eines ersten offenen Kanals im Wachsverdrängungskörper, durch den heißes Wasser geleitet und das dadurch geschmolzene Wachs abgeleitet werden kann. Für komplexe Hohlraumgeometrien ist der Einsatz eines in den Verdrängungskörper eingelegten porösen Schlauches oder Heizdrahtes denkbar. Der Heizdraht schmilzt hierbei das ihn umgebende Wachs und erlaubt somit, dieses mit Druckluft entlang des Drahtes auszublasen. Durch den entstehenden Kanal kann im Folgenden das heiße Wasser gespült werden. Für lineare Bauteile, wie bei dem hier untersuchten Versuchskörper, kann dieser Kanal durch Bohren eines 10 mm dicken Lochs erzeugt werden. Nach 28 Tagen wurden die ungerissenen UHPC Versuchskörper mit einem Außendurchmesser von 120 mm (Wanddicke 10 mm) und 180 mm (Wanddicke 40 mm) für den Versuch verwendet. Der gewählte Versuchsaufbau zum Ausspülen der Verdrängungskörper aus Wachs mittels 95°C heißen Wassers ist in Abbildung 4-60 dargestellt.



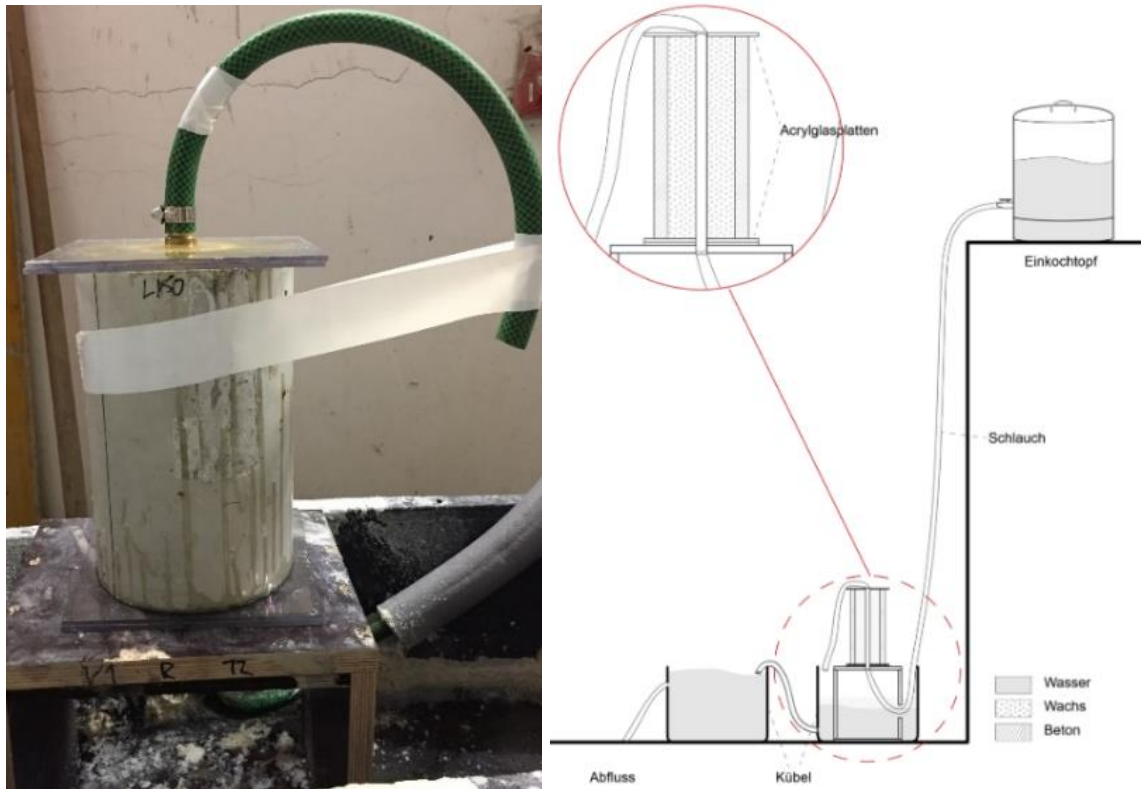


Abbildung 4-60: Realisierung des Versuchsaufbaus am Beispiel des Versuchskörpers Außendurchmesser 180 mm (links), schematische Darstellung des gewählten Versuchsaufbaus zum Ausspülen der Verdrängungskörper aus Wachs mittels heißen Wassers (rechts)

Obwohl bei beiden Versuchskörpern das Wachs mit dem gewählten Lösungsansatz komplett ausgeschmolzen werden konnte (Abbildung 4-61, links), entstanden beim Ausspülen des Versuchskörpers mit dem Außendurchmesser 120 mm Längsrisse (Abbildung 4-61, rechts), die sich auf die Dehnung des Wachses zurückführen lassen. Der Versuchskörper mit einem Außendurchmesser von 180 mm blieb ungerissen (Abbildung 4-61, Mitte).



Abbildung 4-61: Durch Ausspülen mit heißem Wasser vom Wachs befreite UHPC Versuchskörper (links): Außendurchmesser 180 mm – ungerissen (Mitte), Außendurchmesser 120 mm – gerissen (rechts)

#### **4.6.6 Fazit Hohlraum-Wachsschalungen**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie prinzipiell auch für die Herstellung von definierten Hohlräumen in Betonbauteilen mittels ausgeschmolzener, geometrisch komplexer Verdrängungskörper aus CFW (Hohlraum-Wachsschalungen) eignet und dass das Wachs nahezu vollständig wiedergewonnen werden kann, wenn eine Mindestbetondicke eingehalten wird. Da die durchgeführten Versuche eher als Machbarkeitsstudie anzusehen sind, sollten die Ergebnisse in weiterführenden Versuchen auch an komplexeren Geometrien überprüft werden. Mit Bezug auf das FreeFab Verfahren von Gardiner (vergl. 2.4.3.4 und 2.5.4) lässt sich feststellen, dass gedruckte gegenüber aus einem Vollblock gefrästen Hohlraum-Wachsschalungen ggf. vorteilhafter sein könnten, da diese aufgrund ihrer Stützstruktur per se innen hohl sind, sich daher für das Durchleiten von Wasser eignen und aufgrund ihrer geringeren Maße auch eine deutlich geringere Sprengwirkung bei der Erwärmung des Wachses zeigen. Zudem bestehen meist auch nur geringe Ansprüche an die inneren Oberflächen der Hohlräume, sodass die im Druck entstehende schlechte Oberflächengüte zur Reduzierung der Druckzeit in Kauf genommen werden kann.



## 5 Zusammenfassung, Ausblick und Potential

### 5.1 Zusammenfassung

Heutige konventionelle Systemschalungen sind für die schnelle Herstellung einfacher Geometrien optimiert. Die Herstellung von präzisen freigeformten Bauteilen ist zwar technisch möglich, erfordert jedoch aufwendige, teure und abfallintensive Sonderschalungen. Eine Alternative stellen recycelbare Wachsschalungen dar. Die bisherigen Forschungsansätze zeigen jedoch, dass diese in ihrem herstellbaren Formenspektrum und in ihrer Präzision zu begrenzt oder in ihrer Anwendung zu aufwendig sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die grundlegende Entwicklung und Beschreibung einer neuartigen **Non-Waste-Wachsschalungstechnologie** für Sonderschalungen zur Herstellung von geometrisch komplexen und präzisen Betonbauteilen. Insbesondere für den Hochleistungswerkstoff UHPC bietet sich hierdurch zukünftig die Chance, neue Anwendungsgebiete für effiziente filigrane Konstruktionen zu erschließen und diese wirtschaftlich und nachhaltig realisieren zu können.

Die hier entwickelte Wachsschalungstechnologie überwindet die zuvor genannten Einschränkungen hinsichtlich Formenspektrum und Präzision weitestgehend durch die CNC gesteuerte Präzisionszerspanung standardisierter Wachsböcke und einem auf die Technologie abgestimmten Wachs.

Zur Entwicklung und Evaluation der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie war zunächst die Selektion eines geeigneten technischen Wachses erforderlich, welches die grundlegenden Anforderungen an maximale Formfreiheit, Präzision, Nachhaltigkeit sowie Wirtschaftlichkeit erfüllt. Hierzu wurden die an den Sonderschalungen und dem avisierten Fertigungsverfahren definierten Anforderungen mit den experimentell ermittelten Analyseergebnissen unterschiedlicher Wachse verglichen. Anschließend wurde ein Verfahren zur Herstellung großformatiger spannungsarmer Wachsböcke entwickelt. Gleichzeitig wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig optimierte Fräswerkzeuge sowie Bearbeitungsparameter und -bedingungen für die unterschiedlichen Frässtrategien ermittelt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden, zur Evaluation der Formfreiheit, in Abhängigkeit der erreichbaren Präzision unterschiedliche, geometrisch komplexe Wachsschalungen gefertigt, mit denen Bauteile aus normalfestem Beton und UHPC hergestellt wurden. An diesen wurde mithilfe optischer 3D-Messtechnik eine digitale Form- und Maßanalyse durchgeführt. Unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten (Recycling durch zyklisches Einschmelzen und Abkühlen) und durchgeführten Anwendungsbeispielen wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Wachsschalung erstellt. Abschließend wurde die prinzipielle Anwendbarkeit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie für die Herstellung von hohlraumzeugenden Wachsschalungen untersucht. Hierbei lag der Fokus der Untersuchungen auf dem Ausschmelzen des Wachses aus den Betonbauteilen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie zusammengefasst:

#### *Werkstoff Wachs*

Wachs weist aufgrund seiner komplexen polymerchemischen Strukturen und Gefüge ein stark temperatur- und zeitabhängiges Verhalten auf. Die Anwendung im Bauwesen war bisher begrenzt. Seine bautechnisch relevanten physikalisch-mechanischen Eigenschaften waren bisher nur unzureichend quantifiziert. Daher wurden zunächst Untersuchungen zu Fräsbarkeit, Druck-, Biege- sowie Zugfestigkeit und Schubmodul sowie zur Zeitstandfestigkeit, volumenspezifischen Ausdehnung und spezifischen Wärmekapazität durchgeführt. Die dabei ermittelten charakteristischen Kennwerte wurden mit den aufgestellten Anforderungen an Sonderschalungen wie z. B. Krafteinwirkungen, Präzision und Aufnahme der Hydratationswärme abgeglichen. Aus 29 analysierten Wachsen wurden die beiden Wachse PW 3146 und CFW (ConFormWax) als geeignet eingestuft und für die eigentliche

Prozessentwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie verwendet. Der Druck E-Modul und die Festigkeit (Druckfließspannung) des Wachses CFW liegen bei 20°C mit 1923 N/mm<sup>2</sup> bzw. 3,3 N/mm<sup>2</sup> für die Anwendung im Betonschalungsbau in einem günstigen Bereich: starr genug, um hohen Frischbetondrücken standzuhalten, und weich genug für eine effiziente spanende Bearbeitung. Die verfahrensbedingte maximale Gebrauchstemperatur von CFW liegt bei etwa 40°C. Obwohl das Wachs PW 3146 gegenüber CFW bessere, zur Anforderung passende physikalisch-mechanische Eigenschaften aufweist, zeigte PW 3146 eine größere Neigung zu Kantenausbrüchen. Der im Wachs enthaltene Füllstoff Terephthalsäure führte zudem zu einem Ansäuern der damit geschalteten Betonoberflächen. Aus diesem Grund wurden die weiterführenden Versuche mit dem CFW-Wachs durchgeführt.

#### *Herstellung der Wachsböcke*

Die temperaturabhängige Volumenänderung der Wachse ist zu hoch, um großformatige Wachsböcke als Rohling in einem Stück direkt zu gießen, weshalb in den prozessrelevanten Untersuchungen ein Verfahren zu deren Herstellung entwickelt wurde. Durch den Verguss von bereits erkalteten CFW Wachstafeln mit heißem geschmolzenem Wachs können spannungsarme, homogene und nahezu beliebig große Wachsböcke mit geringen Abkühlzeiten hergestellt werden. Zudem wurde ein Verfahren zur Trennung von Wachsschalung und Betonbauteil als Ausschalhilfe entwickelt und geeignete Verbindungs- und Verankerungsmittel für das CFW verifiziert.

#### *Fräsen der Wachsböcke*

Die in Kooperation mit dem IWF durchgeführten Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss der Wachsspezifikationen auf die Zerspanbarkeit zeigten, dass walzenstirnartige Fräser oder Schafffräser mit hohen Drallwinkeln und ausreichend Freiraum zwischen den Schneiden bei einer hohen Zustellung und geringen Vorschubgeschwindigkeiten hervorragende Ergebnisse für das CFW liefern, ohne dabei einen Verschleiß an den Fräsern zu verursachen. Beim Schlichtvorgang zur finalen Oberflächenbearbeitung sollten die Flächen kaskadenartig von hoch nach tief bearbeitet werden, um Kantenausbrüche zu vermeiden. Zum Erreichen einer im Sinne der Architektur optisch glatten Sichtbetonoberfläche ist bei Verwendung von Vollradiusfräsern ( $\varnothing = 20 \text{ mm}$ ) zudem ein Fräsbahnabstand von  $x = 0,5 \text{ mm}$  zu empfehlen. Da eine polymere Kühllösung oder Wasser das Wiedereinschmelzen der damit verunreinigten Wachsspäne stark beeinträchtigt, hat sich als beste Alternative zur Reduktion der Anhaftung von Wachsspänen am Fräser und am Werkstück der Einsatz von eingblasener Druckluft herausgestellt.

#### *Formfreiheit und Präzision der Wachsschalung*

An den aus zusammengesetzten abstrakten Referenzgeometrien (Formenbausteine) bestehenden Wachsschalungen konnte gezeigt werden, dass sich mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie auch großformatige, freigeformte Bauteile mit extrem starken Krümmungen detailgetreu aus UHPC herstellen lassen. Besonders die uni- und multidirektional gekrümmten Oberflächen, die runden und pyramidenförmigen Stümpfe sowie die abgerundeten Stege und Nuten zeigen ein sehr stabiles und detailgetreues Abformungsverhalten. Geometrische Grenzen, welche beim Entwurf von Betonbauteilen unter Verwendung von Wachsschalungen zu berücksichtigen sind, zeigten sich hingegen in den Abformungen feingliedriger, scharfkantiger Detaillierungen, wie z. B. Schrift und rechteckige Stege mit Entformungswinkeln von weniger als 2° und einem Aspektverhältnis größer 1 (Höhe / Breite). Durch den digitalen Abgleich optischer 3D-Messdaten mit den ursprünglichen CAD-Daten in der mit dem Programm GOM Inspect durchgeführten Form- und Maßanalyse konnte gezeigt werden, dass nicht nur die Wachsschalungen, sondern auch die damit hergestellten Bauteile eine für das Bauwesen sehr hohe Präzision aufweisen. Abgesehen von einigen punktuellen fertigungsbedingten Abweichungen liegen die gemessenen Herstellungstoleranzen im Zehntelmillimeterbereich. Auch im Hinblick auf die Präzision war insbesondere das Industrieguss CFW geeignet.

### *Ökologie und Wirtschaftlichkeit*

Aufgrund des Nachweises, dass sich die anfallenden Wachsspäne sowie die ausgedienten Wachsschalungselemente aus CFW durch Einschmelzen mindestens 50-fach wiederverwenden lassen (Closed Loop Recycling), ohne dass sich die Materialeigenschaften ändern, ergeben sich Materialbruttokosten des CFW je Einsatz von 112,8 €/m<sup>3</sup>. Um unter das Kostenniveau des „Einweg“-Schalungsmaterials EPS PS40 von etwa. 80 €/m<sup>3</sup> zu gelangen, ist mindestens eine 75-fache Wiederverwendungsrate des Wachses notwendig. Es wird erwartet, dass diese bei sachgerechtem Umgang erreicht werden kann. Da die Fräszeiten und daraus resultierend die Bearbeitungskosten von EPS gegenüber Wachs nahezu gleich sind, stellt die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie gegenüber EPS Sonderschalungen nicht nur eine prinzipiell ökonomisch effiziente, sondern durch die Vermeidung von Abfall auch eine ökologisch überlegene Alternative dar. Zusätzlich bietet CFW eine höhere Steifigkeit und Oberflächenqualität.

### *Verdrängungskörper aus Wachs*

Die zusätzlichen Untersuchungen zu Verdrängungskörpern aus CFW haben gezeigt, dass sich mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie, bei Einhaltung einer betonabhängigen Mindestdeckung, prinzipiell geometrisch komplexe Hohlräume in Beton erzeugen lassen. Durch Ausschmelzen des Wachses mit heißem Wasser kann dieses dabei nahezu vollständig aus den Betonbauteilen entfernt und wiedergewonnen werden.

### *Anwendung*

Die abschließend durchgeführten Anwendungsbeispiele, u. a. zur Herstellung eines Beton-Fertigteilkons, haben die Erwartungen aller Beteiligten übertroffen und zeigen anschaulich, dass sich die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie mit ihrem derzeitigen grundlegenden Entwicklungsstand auch für komplexe, präzise Schalungen von Standardbetonbauteilen der Fertigteilindustrie anwenden lässt. Wie bereits bei den aus abstrakten Referenzgeometrien bestehenden Wachsschalungen und UHPC Probekörpern nachgewiesen werden konnte, erfüllt die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie auch in den praxisnahen Anwendungsbeispielen die an sie gestellten Anforderungen an maximale Formfreiheit und Präzision.

Ebenfalls konnten hierbei die angefallenen Späne und Wachsschalungen durch Wiedereinschmelzen recycelt werden. Dank dieses „Closed Loop Recycling“ zeigt auch hier die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie eindrucksvoll, dass sie durch Vermeidung von Abfall im Produktionsprozess nachhaltig ist und dies zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit aufgrund einer Reduktion der Materialkosten führen kann. Die Technologie ist aktuell noch komplex in der Anwendung, kann jedoch nach weiteren Entwicklungen und Automatisierungen der einzelnen Prozessschritte in der Zukunft voraussichtlich im Industriemaßstab wirtschaftlich eingesetzt werden.

## 5.2 Ausblick und Potential für weiterführende Entwicklungen

Basierend auf dem Bedarf der Industrie an abfallfreien angepassten Freiformschalungssystemen soll die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie zukünftig für unterschiedliche industrielle Anwendungen weiterentwickelt und optimiert werden. Die Herausforderung bei diesem Transfer der Technologie in die Industrie liegt in der jeweiligen Anpassung des Prozesses und der Materialeigenschaften des Wachses an die unterschiedlichen anwenderspezifischen Anforderungen. Um diese Anpassung für zwei verschiedene Anwendungsbereiche durchzuführen, wurden unter Beteiligung des Autors zwei weiterführende Forschungsprojekte zusammen mit Industriepartnern erfolgreich zur Förderung beantragt, welche aktuell (2019) am ITE bearbeitet werden.

Das erste Forschungsprojekt mit dem Titel „Entwicklung eines modularen und vollautomatischen Produktionsverfahrens für Freiformbetonschalungen im Hochbau auf Basis von technischem Wachs“ wird seit Juni 2017 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert und in Kooperation mit der Firma B+S Engineering [143] durchgeführt. Basierend auf den gestellten Anforderungen an möglichst schnelle Herstellungszeiten von großmaßstäblichen freigeformten Bauteilen aus Normalbeton, als Unikate mit geringen Anforderungen an die Präzision, liegt der Fokus dieses Projektes auf zwei Bereichen: einerseits auf der Modularisierung der Wachsschalungselemente, wofür u. a. ein standardisiertes Grundsystem (Stahl-Verbindungseinheiten) zur Aufnahme und Positionierung des formgebenden Wachses entwickelt wird (Abbildung 5-1, links), andererseits auf der Vollautomatisierung der gesamten Prozesskette (Fließfertigung) und im Besonderen der effizienten Herstellung von Wachsböcken (Rohlingen) durch Pressen von Wachs-Spänen (Abbildung 5-1, rechts). Die geringere Steifigkeit und Robustheit des gepressten Wachses gegenüber gegossenem Wachs wird durch Optimierung der Prozessparameter wie Spangröße, Spantemperatur und Presskraft weiter verbessert (vergl. 4.1.1.6). Das Erreichen gleicher Materialeigenschaften ist dabei chemisch bedingt nicht möglich, aber aufgrund der Anforderungsbedingungen zugunsten schnellerer Herstellungszeiten und eingesparter Schmelzenergiekosten nicht notwendig. Durch Addieren der modularen Wachsschalungselemente zu einer Gesamtschalung sollen Betonbauteile mit komplexen Geometrien im 1:1 Baumaßstab im Rahmen der gestellten Anforderungen wirtschaftlich hergestellt werden können [155].

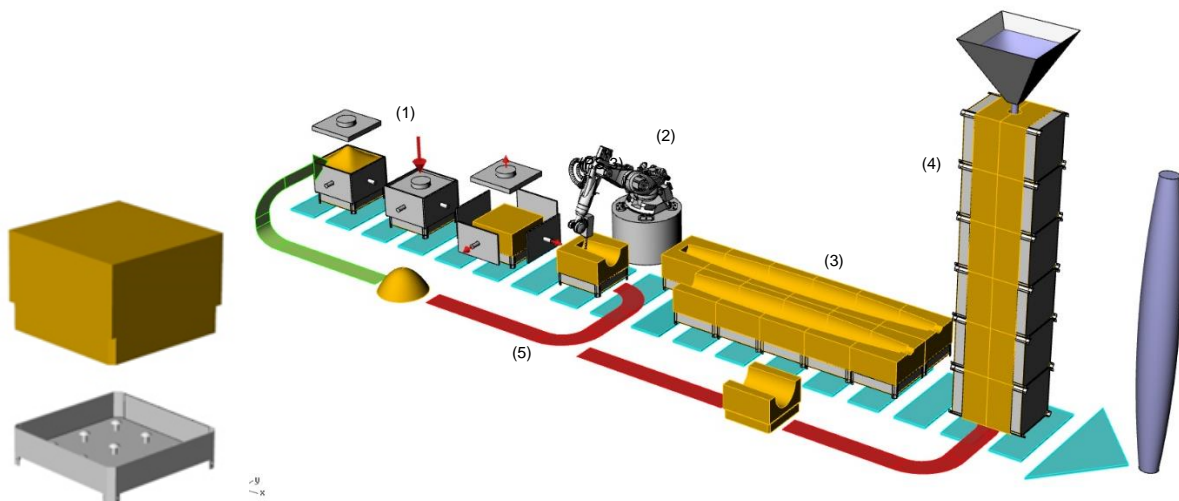


Abbildung 5-1: Prinzip eines unbearbeiteten Wachsschalungselements, bestehend aus Stahl-Verbindungseinheiten und dem aufgepressten, individuell fräsbaren Wachsböckchen (links), Prinzip des vollautomatisierten Fertigungsverfahrens für eine modulare Wachsschalung: (1) Pressen der Wachsspäne zu Blöcken auf eine Stahl-Verbindungseinheit, (2) CNC Fräsen der Form, (3) Zusammenbau der modularen Schalung, (4) Ausbetonieren der Schalung, (5) Wachs Recycling, z. B. durch Schreddern / Mahlen © ITE

Das zweite Forschungsprojekt mit dem Titel „Innovative Non-Waste-Wachsschalungen für die Herstellung von hochpräzisen Maschinengestellen aus UHPC“ wird seit Januar 2018 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und mit den Kooperationspartnern Sudholt-Wasemann [156] und Dyckerhoff [157] durchgeführt. In diesem Projekt sollen mit Wachsschalungen möglichst genaue und geometrisch sehr komplexe Maschinengestelle aus feinkörnigem UHPC in Kleinserien hergestellt

werden. Hierdurch bestehen deutlich höhere Anforderungen an die erreichbare Präzision und Robustheit als im vorgenannten Forschungsprojekt. Der Fokus der Untersuchungen konzentriert sich daher auf die Verbesserung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften des verwendeten Wachses (vergl. 3.4) durch Zugabe von geeigneten Füllstoffen (wie z. B. Rohzellulose, Kalksteinmehl etc.). Neben einer Verringerung der Materialinvestitions- und Recyclingkosten (Schmelzenergiekosten – vergl. 4.4) wird erwartet, dass sich durch die Zugabe von Füllstoffen die thermische volumenspezifische Ausdehnung verringert, was u. a. die Herstellung von direkt gegossenen Wachsböcken vereinfacht.

Gemeinsames Ziel beider Folgeprojekte ist es, für die jeweiligen Anwendungen die Prozesse und die Eigenschaften des Wachses optimal aufeinander abzustimmen und daraus eine Vielzahl weiterer industrieller Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen.

Zudem bietet die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie u. a. die folgenden Potentiale für weiterführende Entwicklungen:

- **Integration von Bewehrung:** Um eine Formgebung nach dem Prinzip „form follows force“ voll auszunutzen, ist nicht nur die Formgebung des Betons selbst, sondern auch die der Bewehrung und deren exakte Positionierung in der Schalung notwendig. Hierzu könnten z. B. im digitalen Prozess mitgefertigte Abstandshalter die Lage eines 3D geformten Karbongewirkes sichern.
- **Kombination mit 3D Betondruck:** Die bis jetzt entwickelten Druckverfahren ermöglichen zwar die exakte Positionierung von Beton, jedoch keine glatten Sichtbetonoberflächen. Für die Herstellung von z. B. parametrisch entworfenen, geometrisch komplexen Fassadenpaneelen könnte eine Kombination aus einhäufiger Wachsschalung und 3D Betondruck, wie dem Shotcrete 3D Printing (SC3DP), eine effiziente Möglichkeit bieten. Die Wachsschalungen ermöglichen eine exakte Oberflächengestaltung und dank des Betondrucks kann auf der Rückseite eine dem Kräftefluss angepasste Tragstruktur hergestellt werden.
- **Thermische Egalisierung der Oberfläche:** Die Herstellung von gekrümmten freigeformten Flächen beim Fräsen der Wachsschalungen erfolgt durch sogenanntes Abzeilen (paralleles Abfahren) der Fläche mit einem Vollradiusfräser (vergl. 4.2.3). Je besser die Oberflächenqualität sein soll, desto enger müssen prinzipiell die Bahnabstände sein und desto höher ist der Zeitaufwand. Um diesen Zeitaufwand zu verringern, könnte statt der geringeren Bahnabstände eine finale Bearbeitung durch eine thermische Egalisierung der Oberfläche (z. B. Heizstrahler, Heißluft, Heißwasserbad etc.) erfolgen.
- **Weiterentwicklung der Hohlraum-Wachsschalungen:** Das Ausschmelzen des Wachses mit heißem Wasser erfordert Energie und Zeit. Um diese zu verringern, sollte die Masse der Hohlraum-Wachsschalungen (Wachs-Verdrängungskörper) auf ein Minimum reduziert, bzw. sollten sie ebenfalls hohl ausgeführt werden. In Abhängigkeit von der Geometrie und des jeweils maßgebenden Frischbetondrucks sollte untersucht werden, inwieweit sich die Wandungsdicke auf ein Minimum reduzieren lässt, ohne dass sie ungewollt eingedrückt oder zerstört wird.
- **Wachsschalungen zum Formen alternativer Materialien:** Neben Betonen eignet sich Wachs prinzipiell auch zum Schalen anderer „relativ kalt“ erhärtenden Materialien wie z. B. Silikon, Polyurethanen oder Epoxidharzen. Neben der Herstellung von Positivformen für Matrzenschalungen (vergl. 2.3.4) zur Großserienfertigung von Betonbauteilen, könnte die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie auch in anderen Disziplinen, wie z. B. im Maschinenbau zur Herstellung von Prototypen, Anwendung finden.



## 6 Quellenverzeichnis

### 6.1 Literaturverzeichnis

- [1] J. Mainka, H. Kloft, E. Stein und F. Wirth, Non-Waste wax formwork-technology: Innovative precision formwork for concrete members made of recyclable industrial waxes, in: Bögle, A., Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017, 25.–28.9.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: S. 180, full paper published digitally: paper no. 957.
- [2] J. Mainka, H. Kloft und E. Stein, A novel precise formwork technology based on CNC milled recyclable industrial wax for the casting of geometrically complex concrete elements, in: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proceedings of the IASS Symposium 2015 & ISOFF Symposium, 17.–20.8. & 16./17.8.2015 in Amsterdam (NL), paper No. IASS2015-517423, 108/2015 (published on USB stick).
- [3] H. Kloft, Tragwerksplanung im Digitalen Workflow, Digital, real: Blobmeister, Birkhäuser, 2001, S. 198–206.
- [4] T. Putke, K. Bergmeister und P. Mark, Wirtschaftliches Konstruieren und Bewehren, Betonkalender 2016, Berlin: Ernst & Sohn GmbH, 2016, S. 695–739
- [5] M. Schmidt, K. Bunje, F. Dehn, K. Droll, E. Fehling, J. Horvath, E. Kleen, K.-H. Reinecke, I. Schachinger, T. Teichmann, M. Teutsch, R. Thiel und N. Tue, Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton, Berlin: Beuth, 2008.
- [6] W. Zimmermann und L. Sparowitz, Vorgespannte Fertigteile aus Ultrahochfestem Faserbeton, Beton- und Stahlbetonbau 107, Heft 3, 2012, S. 200.
- [7] H. Kloft und S. Hoyer, Zum Entwerfen von Tragwerken, Stahlbau Ernst & Sohn, Bd. 83, Nr. 11, 2014, S. 806–814.
- [8] M. Curbach, C. Hamm, M. Schlaich, M. Schnellenbach-Held, W. Sobek und G. Weiß, Antrag an die DFG auf Einrichtung eines Schwerpunktprogramms Leicht Bauen mit Beton, 2009.
- [9] T. Faust, Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau, Berlin: Ernst & Sohn, 2003.
- [10] M. Schlaich und M. El Zareef, Infraleichtbeton, Beton- und Stahlbetonbau, Bd. 1, Nr. 103, 2008, S. 175–182.
- [11] W. Brameshuber, Selbstverdichtender Beton, Schriftenreihe Spezialbetone, Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2004.
- [12] D. W. Johnston, Design and Construction of Concrete Formwork, in: Concrete Construction Engineering Handbook, Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [13] R. Schmitt, Die Schalungstechnik, Berlin: Ernst und Sohn, 2001.
- [14] H. Schroeder, Lehm-bau – mit Lehm ökologisch planen und bauen, Wiesbaden: Vierweg + Teubner GWV Fachverlage GmbH, 2010.
- [15] H. BOEHLING, Chinesische Stampfbauten, in: Sinologica, Basel, 1953, S. 16–22.
- [16] H.-O. Lamprecht, Opus Caementitium, Bautechnik der Römer, Düsseldorf: Beton-Verlag, 1993.
- [17] W. Meyer-Bohe, Geschichte der Vorfertigung, Zentralblatt für Industriebau, Heft 5, S. 186–191.
- [18] K.-J. Kahl, R. Lewandowski, P. Schneider und B. Vogt, Betonbau im Wandel der Zeit, Readdymix-Transportbeton GmbH, Beton-Verlag, 1986.
- [19] D. Billington, Robert Maillart und die Kunst des Stahlbetonbaus, München: Verlag für Architektur, 1990.
- [20] Trauber und Gehler, Die Jarhunderthalle in Breslau, Springer Verlag Berlin Heidelberg GMBH, 1914.
- [21] G. Ruffert, G. Brux und H.-J. Bandzong, Spritzbeton, Renningen-Malmsheim: V.M.M. Fachverlag, 1995.

- [22] C. Bärenwinkel, E. Hellmuth, J. Krausse und M. Ludwig, Wissen in Bewegung: 80 Jahre Zeiss-Planetarium Jena, Jena: Hans-Christian von Herrmann: Ernst-Abbe-Stiftung, 1. Aufl., 2006.
- [23] H. Michael, Sichtbar geformter Beton, Tec21 / Baufachinformation, Bd. 130, Heft 44 Beton, 2004, S. 6–9.
- [24] F. Kind-Barkauskas, B. Kauhsen, S. Polónyi und J. Brandt, Beton-Atlas: Entwerfen mit Stahlbeton im Hochbau, Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2001.
- [25] C. Hegner-van Rooden, Die Narben der Baugeschichte – Sichtbeton, Instandgesetzt (Goetheanum), Tec21, Nr. 5–6, 2016, S. 20–24.
- [26] W. Schreier und H. Schreier, Thomas Alva Edison, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 4. Aufl., 1987.
- [27] P. Grupp, Schalungsatlas, Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2009.
- [28] H. Kloft, Nonstandard Structures / Mass Customization, GAM – Graz Architectur magazin, 2010, S. 107–127.
- [29] S. Hickert und U. Knaack, Evaluation of free-form concrete architecture, molding systems and their technical potentials, Journal of Facade Design and Engineering 3, 2015, S. 273–288.
- [30] P. Jodidio, Hadid, Köln: Taschen GmbH, 2013.
- [31] J. Grimm und W. Grimm, Deutsches Wörterbuch, 16 Bde. in 32 Teilbänden, Leipzig 1854–1961. Leipzig 1971.
- [32] Duden (Schalung) [Online], <http://www.duden.de/rechtschreibung/Schalung> [Zugriff am 01.03.2017].
- [33] DIN EN 12812 (2008-12) Traggerüste – Anforderungen, Bemessung und Entwurf, Deutsche Fassung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [34] Wikipedia.org – Schalung (Beton) [Online], [https://de.wikipedia.org/wiki/Schalung\\_\(Beton\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Schalung_(Beton)) [Zugriff am 03.03.2017].
- [35] W. Jeromin, Gerüste und Schalungen im konstruktiven Ingenieurbau, Berlin-Heidelberg: Springer, 2003.
- [36] DIN 8580 (2003-09) Fertigungsverfahren, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [37] www.beton.wiki [Online], <http://www.beton.wiki/index.php?title=Schalungshaut> [Zugriff am 16.06.2017].
- [38] DIN 68792 (2016-08) Großflächen-Schalungsplatten aus Furniersperrholz für Beton und Stahlbeton, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [39] DIN EN 13377:20 (2002-11) Industriell gefertigte Schalungsträger aus Holz, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002.
- [40] DIN 18216 (1986-12) Schalungsanker für Betonschalungen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1986.
- [41] DIN EN 13670 (2011-03) Ausführung von Tragwerken aus Beton, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [42] DIN 1045-3 (2012-03) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3 Bauausführung, Anwendungsregeln zur DIN EN 13670, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [43] DBV-Merkblatt Sichtbeton, Deutscher Beton- und Bautechnikverein E.V., Berlin, Fassung Juni 2015.
- [44] DIN 55350 Teil 13 (1987) Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1987.
- [45] Normenausschuss Bauwesen (NABau), DIN 18202 (2005-10) Toleranzen im Hochbau, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005.
- [46] DIN EN 13369 (2013) Allgemeine Regeln für Betonfertigteile, Deutsche Fassung der EN 13369:2013, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [47] DIN 18203-1 (1997) Toleranzen im Hochbau, Teil 1: Vorgefertigte Teile aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton (zurückgezogen), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1997.

- [48] DIN ISO 2768 (1991) Allgemeintoleranzen für Längen und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragungen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1991.
- [49] S. Henze, Entwicklung und Beschreibung des Tragverhaltens einer modularen Fachwerkkonstruktion aus Hochleistungsbeton, Leipzig: Dissertation, 2009.
- [50] P. Group, Peri.de – Handbuch: Schalung Gerüst Engineering [Online], <https://www.peri.de> [Zugriff am 22.06.2017].
- [51] S. Oesterle, A. Vansteenkiste und A. Mirjan, Zero Waste Free-Form Formwork, in: icff – second international conference on flexible formwork, University of Bath (UK), 2012.
- [52] K. Bollinger, A. Grohmann, A. Weiland und M. Wagner, ROLEX LEARNING CENTER in Lausanne: From conceptual design to execution, in: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia, 2009.
- [53] A. Walz, Design to Production [Online], <http://www.designtoproduction.ch/content/view/15/28/> [Zugriff am 06.10.2013].
- [54] Schlaich Bergerman und Partner [Online], [http://www.sbp.de/de/build/sheet/1252-Mitarbeiterrestaurant\\_Boehringer\\_Ingelheim.pdf](http://www.sbp.de/de/build/sheet/1252-Mitarbeiterrestaurant_Boehringer_Ingelheim.pdf) [Zugriff am 06.10.2013].
- [55] H. Budelmann und H. Kloft, DFG Forschungsantrag – Entwicklungen neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen und Stabtragwerke, Braunschweig, 2011.
- [56] D. T. Institute, TaylorCrete, © 2014 [Online], <http://www.tailorcrete.com/27156> [Zugriff am 25.11.2014].
- [57] Hünnebeck [Online], <https://www.huennebeck.de/produkte/schalung/spezielschalungen/napla> [Zugriff am 08.11.2017].
- [58] H. & Sohn [Online], <http://www.huber-sohn.de> [Zugriff am 25.11.2014].
- [59] Peri GmbH: Kühne Formen und außergewöhnliche Sichtbetonqualität, Peri, 2012.
- [60] OBO-Werke, Obomodulan PU-Platten [Online], <http://www.obo-werke.de/produkte/obomodulanr-pu-platten.html> [Zugriff am 20.11.2014].
- [61] L. Ledderose, S. Lehmberg, F. Wirth, H. Budelmann und H. Kloft, From digital design to precise production: Dry-jointed coffered ceiling made of UHPFRC-components, in: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS Symposium 2017), Hamburg, 2017.
- [62] S. Lehmberg, Dünnwandige, trocken gefügte Bauteile aus ultrahochfestem faserverstärkten Feinkornbeton, Technische Universität Braunschweig: Dissertation, 2017.
- [63] Wikipedia – Polystyrol Abfallproblematik [Online], <http://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol#Abfallproblematik> [Zugriff am 01.12.2014].
- [64] Paschal, Paschal Germany [Online], <http://www.paschal.de/english/news/article/LOGO-TailorCrete-concrete-sculpture-Aarhus.php> [Zugriff am 20.11.2014].
- [65] architizer.com [Online], [architizer.com](http://architizer.com). [Zugriff am 22.11.2014].
- [66] D. Shape, DOKA [Online], <http://www.doka.com/web/products/system-groups/doka-wall-systems/timber-beam-formwork/dokashape/index.de.php> [Zugriff am 05.12.2014].
- [67] Pultex, Polyurethan-Spritzcoating PULOcoat 0700 [Online], <http://www.pultex.de/go/produkte-details/203-pulocoat-0700-styroporbeschichtung-polyurethan.html> [Zugriff am 25.11.2014].
- [68] Accentform, Accentform, Städe-Museum in Frankfurt a. M. [Online], <http://www.accentform.com/kunststoffverarbeitung/bau-architektur/betondecke-staedel-museum> [Zugriff am 04.07.2014].
- [69] Quepas [Online], <http://www.quepas.de/schalung.asp> [Zugriff am 30.11.2017].

- [70] ODICO Formwork Robotics [Online], [www.odico.dk](http://www.odico.dk) [Zugriff am 25.09.2018].
- [71] DIN V 4034-1 (2004-08) Schächte aus Beton-, Stahlfaserbeton- und Stahlbetonfertigteilen für Abwasserschächte und -kanäle, Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [72] OSD office for structural design [Online], <https://www.o-s-d.com/de/tragwerk/messe-event/cocoon-club-frankfurt> [Zugriff am 25.09.2018].
- [73] F. Hoffmann, Schalungstechnik mit System, Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH, 1993.
- [74] D. Veenendaal, M. West und P. Block, History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting, Structural Concrete, Berlin: Ernst & Sohn, 2011, S. 164–177.
- [75] R. N. Dent, Principles of pneumatic architecture, London: Architectural Press, 1971.
- [76] W. Sobek, Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalungen: Aus den Arbeiten des Instituts für Massivbau Uni Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Jörg Schlaich, Stuttgart: Verlag Ursula Sobek, 1987.
- [77] Die Pneumatic Wedge Methode für Freiform-Betonschalen, Beton- und Stahlbetonbau 109, Heft 11, 2014, S. 792.
- [78] International Society of Fabric Forming (ISOFF) [Online], <http://www.fabricforming.org/> [Zugriff am 12.12.2017].
- [79] D. Veenendaal und P. Block, Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork, Engineering Structures 75, 2014, S. 39–50.
- [80] ETH Zürich, Praxistest, Medienmitteilung ETH Zürich (12.01.2017) – Innovative Dachkonstruktion besteht Praxistest [Online], <https://www.ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2017/10/innovative-construction.html> [Zugriff am 26.09.2018].
- [81] M. Michel und U. Knaack, Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für freigeformte Betonschalen und Wände, Bautechnik 91, 2014, S. 845–853.
- [82] ADAPA [Online], <http://adapa.dk> [Zugriff am 15.12.2017].
- [83] H.R. Schipper, Double-curved precast concrete elements: Research into technical viability of the flexible mould method, TU Delft (NL): Dissertation, 2015.
- [84] F. Gramazio, M. Kohler, A. Mirjan, S. Oesterle und A. Vanssteenkiste, [holcimfoundation.org/Architecture & Digital Fabrication, ETH Zurich](http://www.holcimfoundation.org/Architecture%20Digital%20Fabrication,%20ETH%20Zurich) [Online], <http://www.holcimfoundation.org/Portals/1/docs/A12/A12in1CH/A12GLin1CH-posterhigh.pdf> [Zugriff am 04.06.2013].
- [85] S. Neudecker, H. Lindemann, J. Petri und H. Kloft, DBFStudio – Evaluation and development of research topics through the application of advanced fabrication technologies, in: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Tokio, Japan, 2016.
- [86] H. Lindemann, S. Neudecker, J. Petri und H. Kloft, Process chain for the robotic controlled production of non-standard, double curved, fiber reinforced concrete panels with an adaptive mold, in: Fabricate 2017, Stuttgart, 2017.
- [87] F. Gramazio, M. Kohler, A. Mirjan, S. Oesterle und A. Vanssteenkiste, [holcimfoundation.org Acknowledgement Prize Europe 2011](https://src.lafargeholcim-foundation.org/dnl/f03786c0-f28f-461d-872a-4a4e46f8c033/HolcimAwards11_EUR_acknB.pdf) [Online], [https://src.lafargeholcim-foundation.org/dnl/f03786c0-f28f-461d-872a-4a4e46f8c033/HolcimAwards11\\_EUR\\_acknB.pdf](https://src.lafargeholcim-foundation.org/dnl/f03786c0-f28f-461d-872a-4a4e46f8c033/HolcimAwards11_EUR_acknB.pdf) [Zugriff am 02.01.2018].
- [88] A. Libringshausen, P. Eisenbach und M. Grohmann, Re-usable concrete formwork system made of sand and wax, in: Bögle, A., Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017, 25.–28.9.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: S.181, full paper published digitally: paper no. 9249, 9 pa.
- [89] O. Gericke, W. Haase und S. Werner, Production of Curved Concrete Sandwich Panels Using a Frozen Sand Formwork, in: Bögle, A., Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science –

- Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017, 25.–28.9.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: S.181, full paper published digitally: paper no. 9660.
- [90] E. Lloret Fritsch, L. Reiter, T. Wangler, F. Gramazio, M. Kohler und R. J. Flatt, Smart Dynamic Casting: Slipforming with Flexible Formwork – Inline Measurement and Control, in: Proceedings of the Second Concrete Innovation Conference (CIC), Tromsø, Norway, 2017.
- [91] G. Kohler, GramazioKohlerResearch [Online], <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/223.html> [Zugriff am 27.09.2018].
- [92] D. L. W. X. Lei Yu, Luo Dan's Archive, Architecture School, Tsinghua University, Beijing China [Online], <https://luodan.live/2018/05/24/dynamic-robotic-slip-from-casting-and-eco-friendly-building-facade-design/> [Zugriff am 27.09.2018].
- [93] H. Lindemann, A. Fromm, J. Ott und H. Kloft, Digital Prefabrication of freeform concrete elements using shotcrete technology, in: Bögle, A., Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017, 25.–28.9.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: S. 85, full paper published digitally: paper no. 9978.
- [94] A. Fromm, 3-d-Printing zementgebundener Formteile – Grundlagen, Entwicklung und Verwendung, Dissertation, Kassel: Kassel University Press, 2014.
- [95] D. Weger, D. Lowke und C. Gehlen, 3D Printing of Concrete Structures with Calcium Silicate based Cements using the Selective Binding Method, in: Hipermate 2016 – 4th Int. Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials, Kassel, 2016.
- [96] J. Mainka, S. Lehmborg, H. Budelmann und H. Kloft, Non-Standard Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC, Beton- und Stahlbetonbau 108 – 11, 2013, S. 763–773.
- [97] S. Davies, TCT Mag: Nothing is set in stone, 28.12.2017 [Online], <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/nothing-is-set-in-stone/> [Zugriff am 04.01.2018].
- [98] D. Architects, 3DPRINTECANALHOUSE [Online], <http://3dprintcanalhouse.com/> [Zugriff am 12.12.2016].
- [99] J. Teizer, A. Blickle, M. König, H. Mattern, O. Leitzbach, T. King und D. Günther, 3D-Druck im Sonderschalungsbau, Bauingenieur, Jahresausgabe VDI-Bautechnik 2017/2018, 2017, S. 119–128.
- [100] Soliscape [Online], <https://www.soliscape.com/products/3d-materials/> [Zugriff am 08.01.2018].
- [101] J. B. Gardiner und S. R. Janssen, FreeFab – Development of a Construction-Scale Robotic Formwork 3D Printer, in: W. McGee and M. Ponce de Leon (Hrsg.), Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design, Springer International Publishing Switzerland 2014, 2014.
- [102] J. B. Gardiner, S. R. Janssen und N. Kirchner, A Realisation of a Construction Scale Robotic System for 3D Printing of Complex Formwork, in: 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2016), Proceedings of a meeting held, 18–21 July 2016, Auburn, Alabama, USA, 2016.
- [103] D. P.- u. Markenamt, DERPARTISnet – Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamtes [Online], <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet> [Zugriff am 01.11.2014].
- [104] K. Dittmann, Verfahren zur automatischen Herstellung von Sonderteilen aus Beton und Stahlbeton, Inhaber: Dittmann, Deutschland Patent DE 3735806 C1, 22.10.1987.
- [105] H. Ahonen, R. Hakulinen und E. Lahti, Method for the manufacture of moulds, Inhaber: MNK-Rakennusosakeyhtio, Großbritannien, Patent GB 2170752 B, 07.02.1986.
- [106] J. B. Gardiner und S. R. Janssen, Method for casting a construction element, Anmelder: Laing o'Rourke Australia PTY Ltd. (Status einer Patentanmeldung), Australien Patent PCT/AU2014/000160 – IPN: WO 2014/127426 A1, 21.02.2014.
- [107] AusPat, Australische Patentbehörde [Online], <http://pericles.ipaustralia.gov.au/ols/auspat/applicationDetails.do?applicationNo=2014218520> [Zugriff am 18.01.2018].



- [108] K. Müller, M. Jürgen, J.-H. Schwabe und M. Walter, Verfahren zur Herstellung einer Negativform für die Fertigung von einem Gerinne aufweisenden Schachtbodenstück, Anmelder: BFS Betonfertigteilesysteme GmbH, Deutschland Patent DE 10 2007 017 471 A1 2008.10.16, 13.04.2007.
- [109] H.-J. Erdbrügger, Negativform zur Herstellung eines ein Gerinne aufweisenden Schachtunterteils sowie Verfahren zur Herstellung eines derartigen Schachtunterteils, Deutschland Patent DE 10023009050487 A1, 23.10.2009.
- [110] Robatex GmbH, Formkörper für lichtleitende Betonelemente mit definierter Einzelfaseranordnung, Gebrauchsmuster Deutschland Patent DE 20 2008 012 108 U1 2008.12.18, 13.11.2008.
- [111] E. Bartholomé, E. Biekert, H. Hellmann, H. Ley, M. Weiger und E. Weise, Ullmanns Encyklopädie der Technischen Chemie – Band 24, Wachse bis Zündhölzer. XV, 4. Aufl., Weinheim: Verlag Chemie, 1983.
- [112] R. Büll, Vom Wachs, Band 1 und 2, Frankfurt/M: Farbwerke Hoechst AG, 1959.
- [113] J. H. Heinrich Heydt, Römpf Chemie Lexikon – Wachs, Thieme Chemistry, Online Datenbank, 2018.
- [114] Deutsche Gesellschaft für Fettwissenschaft e.V. (Hrsg.) / Fiebig, Hans-Jochen (Bearb.): Deutsche Einheitsmethoden zur Untersuchung von Fetten, Fettprodukten, Tensiden und verwandten Stoffen, 2. Auflage, Stuttgart: Loseblatt-Ausgabe, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stand: August 2016.
- [115] H. Budelmann, W. Hermerschmidt und L. Brahmman (Hrsg.), Baustoffkunde 1, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Inst. für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau, WS 2011/12, 9. Auflage.
- [116] E. Krendlinger, U. Wolfmeier, H. Schmidt, F.-L. Heinrichs, G. Michalczyk, W. Payer, W. Dietsche, K. Boehlke, G. Hohner und J. Wildgruber, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Waxes, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG, Published Online, DOI: 10.1002/14356007.a28\_103.pub2, Weilheim, 26.11.2015.
- [117] C. Zerbe, Mineralöle und verwandte Produkte, 2. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 1969.
- [118] R. Büll und G. Rosenheim, Wachs als Gegenstand der naturwissenschaftlichen Forschung und der Anwendungstechnik, Frankfurt/M.: Höchst Farbwerke, 1961.
- [119] H. P. Latscha, U. Kazmaier und H. A. Klein, Organische Chemie: Chemie-Basiswissen II, 6. Aufl., Berlin: Springer Spektrum, 2013.
- [120] B. Tieke, Makromolekulare Chemie: Eine Einführung, Wiley-VCH, Weinheim, 2005.
- [121] Wikipedia.org – Polyethylen [Online], <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyethylen> [Zugriff am 31.01.2018].
- [122] R. B. Richards, Polyethylene-structure, crystallinity and properties, in: Journal of Applied Chemistry 1, Nr. 8, S. 370–376, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG, Published Online, doi:10.1002/jctb.5010010812, Weilheim, 04.05.2007.
- [123] K. Beuthner und W. Caseri, Römpf Chemie Lexikon Polyethylene, Thieme Verlagsgruppe, Online Datenbank, 2018.
- [124] H. Budelmann, N. Nolte und L. Mengel (Hrsg.), Baustoffkunde 2, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Inst. für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau, SS 2017, 10. Auflage.
- [125] F. Johannaber und W. Michaeli, Handbuch Spritzgießen, 2. Aufl., München: Hanser, 2014.
- [126] H. Kappert und K. Eichner, Zahnärztliche Werkstoffkunde und ihre Verarbeitung, Band 1, Grundlagen und Verarbeitung, 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl., Stuttgart: Thieme 2008.
- [127] H. Caesar und S. Ernst, Die Nichtmetalle (Grundwissen für Zahntechniker). 5. Aufl., München: Verlag Neuer Merkur, 2007.
- [128] DIN 18218 (2010-01) Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.

- [129] B. Freund, T. Proske und C.-A. Graubner, Experimentelle Untersuchungen und numerische Verifizierung zum Frischbetondruck bei geneigten Schalungssystemen, Beton- und Stahlbetonbau 109, 2014, S. 803–81.
- [130] DIN ISO 51579 (2010) Prüfung von Paraffin – Bestimmung der Nadelpenetration, Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung (FAM), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [131] DIN ISO 2207 (1983) Bestimmung des Erstarrungspunktes bei Mineralölparaffin, Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung (FAM), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1983.
- [132] DIN ISO 2176 (1997) Bestimmung des Tropfpunktes – Schmierfette/Mineralölerzeugnisse, Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung (FAM), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1997.
- [133] S. Hiebler, Kalorimetrische Methoden zur Bestimmung der Enthalpie von Latentwärmespeichermaterialien während des Phasenübergangs, TU München: Dissertation, 31.05.2007.
- [134] B. Benzler, Thermische Kennzahlen von Fetten: DSC-Analyse oder Tropfpunktbestimmung, Gießen: Mettler Toledo, , 1/2000.
- [135] ISO 11359-2 (1999-10) Kunststoffe – Thermomechanische Analyse (TMA) – Teil 2: Bestimmung des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der Glasübergangstemperatur, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1999.
- [136] DIN 53752 (1980-12) Prüfung von Kunststoffen, Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1980.
- [137] M. Schimmelpfennig, K. Weber, F. Kalb, K.-H. Feller, T. Butz und M. Matthäi, Volumenausdehnung von Paraffinen aus Steigrohr-Messungen, Jena, Hamburg.
- [138] J. Ullrich, Römpf Chemie Lexikon – Terephthalsäure, Thieme Chemistry, Online Datenbank, 2007.
- [139] DIN EN 196-1 (2016-11) Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [140] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. – Normenausschuss Kunststoffe, DIN ISO 604 (2003) Bestimmung von Druckeigenschaften – Kunststoffe (Normenausschuss Kunststoffe), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [141] T. Craipeau, T. Lecompte, F. Toussaint und A. Perrot, Evolution of Concrete/Formwork Interface in Slipforming Process, in: Proceedings of the First RIELEM International Conference on Construction and Digital Fabrication – Digital Concrete, Zürich, CH, 2018.
- [142] Mettler-Toledo GmbH, Analytical – Thermal Analysis Excellence – [www.mt.com](https://www.mt.com/dam/Analytical/ThermalAnalysis/TA-PDF/DMA1_Brochure_de_30129291A_V02.16.pdf) [Online], [https://www.mt.com/dam/Analytical/ThermalAnalysis/TA-PDF/DMA1\\_Brochure\\_de\\_30129291A\\_V02.16.pdf](https://www.mt.com/dam/Analytical/ThermalAnalysis/TA-PDF/DMA1_Brochure_de_30129291A_V02.16.pdf) [Zugriff am 20.09.2018].
- [143] B+S Engineering GmbH, Kanalstraße 63, 48432 Rheine [Online].: <http://www.bs-baumaschinen.com/>
- [144] Schneider Bautabellen für Ingenieure, 20. Aufl., Köln: Werner Verlag, 2012.
- [145] Schaltec [Online], <http://www.schaltec.de/zubehoer/schalungszubehoer/huenebeck-harsco/2393/schaltec-triton-ausschalhilfe?c=129>
- [146] J. Mainka, S. Baron, H. Kloft und K. Dröder, Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisionsschalungen aus recycelbaren Industriewachsen, Beton- und Stahlbetonbau, 2016, S. 1–12.
- [147] C. Joas, Bachelor's Thesis in der Fachrichtung Baukonstruktion, Testgeometrien für das selektive Binden von Holzspänen mit Zement – Konzeption, Modellierung und praktische Umsetzung, Technische Universität München: Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, 2012.
- [148] G. Inspect [Online], <http://www.gom.com/de/3d-software/gom-inspect.html> [Zugriff am 02.08.2016].
- [149] Hieber Fertigteilsysteme in Beton [Online], <http://www.hieber-beton.com/> [Zugriff am 28.03.2018].
- [150] Cobiax, Technologie GmbH: Innovative Lösungen für nachhaltige Stahlbetonbauten, Beton- und Stahlbetonbau, Nr. 06/2011, S. A27.

- [151] Fa. Beeplate [Online], <http://www.beeplate.com>.
- [152] DIN EN 13747 (2010-08) Betonfertigteile – Deckenplatten mit Ortbetonergänzung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [153] Stiftung Deutscher Nachhaltigkeitspreis e.V. [Online], <http://www.nachhaltigkeitspreis.de/1441-0-Nominierte-2013.html>
- [154] J. Schnell, C. Albrecht, A. Albert und K. Pfeffer, Bemessung und Konstruktion von zweiachsig gespannten Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern, Beton- und Stahlbetonbau, Bd. Heft 9, Nr. 107 – 10/12, 2012, S. 590–600.
- [155] F. Wirth, J. Mainka und K. Harald, Modular and fully automated production process for free-form concrete moulds on the basis of technical waxes, CPI Worldwide, 2018, S. 152–158.
- [156] Sudholt-Wasemann GmbH, Daimlerstraße 3, 33442 Herzebrock-Clarholz [Online], <https://www.sudholt-wasemann.de/>
- [157] Wilhelm Dyckerhoff Institut, Dyckerhoffstraße 7, 65203 Wiesbaden [Online], <http://www.dyckerhoff.com>
- [158] Wikipedia – Laing O'Rourke [Online], [https://de.wikipedia.org/wiki/Laing\\_O%E2%80%99Rourke](https://de.wikipedia.org/wiki/Laing_O%E2%80%99Rourke) [Zugriff am 08.01.2018].
- [159] E. Widmer, Fräsen und Verzahnen, Basel: Birkhäuser, 1979.
- [160] DFG GEPRIS – Projekt: Innovative Non-Waste-Wachsschalungen für die Herstellung von hochpräzisen Maschinengestellen aus UHPC [Online], <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/387520741> [Zugriff am 14.07.2018].

**6.2 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Sichtbetonklassen und zugehörige Anforderungsklassen aus [43] .....	18
Tabelle 2:	Schalungshautklassen aus [43] .....	18
Tabelle 3:	Vergleich der zulässigen / empfohlenen Grenzmaße (Toleranzen) in [mm] für beispielhafte Längenmaße (Nennmaße) der DIN 18202 [45], DIN 18203-1 [47], DIN EN 13369 [46] und DIN ISO 2768 [48] .....	19
Tabelle 4:	Verwendete Schlüsselwörter und Suchmethoden zum Finden von relevanten Patenten auf DEPATISnet [103] .....	47
Tabelle 5:	Zusammensetzung und Eigenschaften der verwendeten UHPC ND-2,5 Rezeptur, basierend auf UHPFRC ND-2,5 aus [62] .....	64
Tabelle 6:	Anforderungsprofile für Wachse als Schalungsmaterial .....	68
Tabelle 7:	Vereinfachte Anforderungen für Wachse als Schalungsmaterial .....	69
Tabelle 8:	Übersicht der als prinzipiell geeignet eingestuften Wachse von unterschiedlichen Wachsherstellern .....	70
Tabelle 9:	Relevante Ergebnisse der DSC Analyse für die 10 ausgewählten Wachse.....	77
Tabelle 10:	Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung mittels Pausch THB-10.....	78
Tabelle 11:	Thermische volumenspezifische Ausdehnung, zur jeweiligen gemittelten Rohdichte und der Bezugstemperatur 20°C normiert [Vol.-%] .....	80
Tabelle 12:	Versuchsergebnisse der gegossenen Wachsprobekörper (Mittelwerte) .....	83
Tabelle 13:	Relevante Druckeigenschaften der Wachse im einachsigen Zylinderdruckversuch .....	86
Tabelle 14:	E-Module der Wachse in Abhängigkeit zur Temperatur der Probekörper in [MPa] (E-Modul jeweils zwischen $\varepsilon_1 = 0,5 \%$ und $\varepsilon_2 = 0,9 \%$ Dehnung ermittelt und gerundet) .....	90
Tabelle 15:	Im Tastversuch gemessene Verformungen von Wachsen über die Zeit bei einer konstanten Belastung von 1 N/mm <sup>2</sup> .....	93
Tabelle 16:	Versuchsergebnisse Zugprüfung – gemittelte Werte.....	94
Tabelle 17:	Definition der relevanten Bearbeitungsparameter beim Fräsen mit bestimmten Schneiden .....	113
Tabelle 18:	Kostenvergleich für die reine Schalungsherstellung am Beispiel des Muster-Fertigteilkons (netto) .....	136
Tabelle 19:	Maximale Temperaturen aller Messpunkte in den jeweiligen Versuchsschalungen (ermittelt über 68 Stunden nach dem Einfüllen) .....	142

### 6.3 Abbildungsverzeichnis

Bei allen, die durch Überlassung ihrer Bildvorlagen, durch Erteilung von Reproduktionserlaubnis und durch Auskünfte am Zustandekommen dieser Dissertation mitgewirkt haben, möchte ich mich aufrichtig bedanke. Trotz intensiven Bemühens konnten nicht alle Urheber von Abbildungen ermittelt werden, ihre Urheberrechte sind jedoch gewahrt. In diesen Fällen wird um entsprechende Nachricht gebeten. Fotos / Abbildungen, die hier nicht aufgeführt sind oder keine Quellenangabe besitzen, stammen vom Autor und dürfen ohne dessen Zustimmung nicht vervielfältigt werden.

Abbildung 1-1: Optimierungspotential von Betonbauteilen am Beispiel eines Einfeldträgers aus Beton bei gleicher Tragfähigkeit [4].....	1
Abbildung 1-2: Museum der Zivilisationen Europas und des Mittelmeers (MuCEM) in Marseille: Außenansicht der vorgehängten Fassade bestehend aus 384 UHPC-Paneelen (links), tragende freigeformte Baumstützen aus vorgespanntem UHPC (rechts) .....	2
Abbildung 1-3: Prinzip des Prozessablaufes zur Herstellung von Wachsschalungen für Betonbauteile aus formstabilen (serienfähigen) Geometrien mithilfe geprüfter Wachsschalungen (gelb) am Beispiel eines organisch geformten Knotenelements für UHPC Stabwerke; bei Betonbauteilen aus formzerstörenden Geometrien besteht alternativ die Möglichkeit, das Betonbauteil thermisch durch Abschmelzen auszuschalen. ....	4
Abbildung 1-4: Strukturdiagramm dieser Arbeit .....	7
Abbildung 2-1: Herstellung von Lehmsteinen im alten Ägypten, ca. 1500 v. Chr.; Darstellung im Grabmal des Großwesirs Rechmire, Theben-West [14] (links), historische Darstellung der Stampflehm-Bauweise im alten China, Shang-Dynastie ca. 1320 v. Chr. [15] (rechts) .....	8
Abbildung 2-2: Kuppel des Pantheons in Rom Foto H. Kloft (links), Joseph Monier neben Schalung für Blumenkübel (um 1850) [17] (rechts) .....	9
Abbildung 2-3: Jahrhunderthalle in Breslau: Innenansicht der Rippenkuppel aus Stahlbeton 1911–1913 [20] (links), Lehrgerüst und Schalung der Hauptbögen [20] (Mitte), Schalungsinnenansicht und Eisenlagen der Hauptbögen [20] (rechts).....	9
Abbildung 2-4: Erstes Zeiss-Planetarium Jena: Herstellen der Betonkuppel auf dem Dach des Zeiss-Werks, 1924 [21] (links), Einschalen des Netzwerks (rechts) [22].....	10
Abbildung 2-5: Zweites Goetheanum Dornach/Schweiz von Rolf Steiner, erbaut in den Jahren 1925 bis 1928 (links), Komplexer manueller Schalungsbau für die Fassade des zweiten Goetheanum Foto: Goetheanum Dokumentation (rechts) [18] .....	11
Abbildung 2-6: Beton-Fertighaus von Thomas Alva Edison 1910 (links), gusseiserne Schalung des „Betongießhauses“ (rechts) [26] .....	12
Abbildung 2-7: phaeno Wolfsburg: Unteransicht digitales Modell (links oben) und digitales Formfindungsmodell (links unten), Südansicht Stützen-Cones mit Decke über EG (Mitte) ©Foto: Klemens Ortmeyer, Hannover, uniachsal gekrümmte Trägerschalung eines Stützen-Cones (rechts) ©Fotos: Klemens Ortmeyer, Hannover.....	14
Abbildung 2-8: phaeno Wolfsburg: Schalung im oberen Kragenbereich der Stützen-Cones am Übergang zum Decke, Schalungskörper aus CNC geprüfem und beschichtetem EPS (links), PVC Schalungskörper für Bodenfenster vor Betonierung der Decke über EG (Mitte) ©Foto: Klemens Ortmeyer, Hannover, Abfall: PVC Schalungskörper für Bodenfenster und EPS (rechts) ©Foto: Sebastian Hoyer, Braunschweig .....	14
Abbildung 2-9: Rahmenschalung der Fa. Peri, Typ: DOMINO (links), LRS Richtschloss für bündige Elementverbindungen [50] (rechts) .....	21
Abbildung 2-10: Trägerschalung: der Fa. Doka, Typ FF20 (links), Fa. Peri, Typ VARIO GT 24 Träger-Wandschalung (Mitte), Fa. Peri, Typ SKYTABLE Trägerschalung als Deckentisch (rechts) [50] .....	22
Abbildung 2-11: Trägerschalungssystem für unidirektionale Krümmungen Fa. Peri: Typ: RUNDFLEX Plus Rundschalung, Radien ab 2,50 m Durchmesser (links),Typ: GRV Gelenkriegel Rundschalung, Radien ab 0,9 m Durchmesser (rechts) [50] .....	22
Abbildung 2-12: Kategorisierung unterschiedlicher Kurvenradien von Freiformbauteilen [56] .....	24
Abbildung 2-13: Radiales Summendiagramm des jeweils maßgebenden Krümmungsradius in Metern (Zahlen im Umfang des Kreisdiagramms) von 160 realisierten uni- oder multidirektional gekrümmten Betonbauten [29].....	25
Abbildung 2-14: Manuelle Fertigung von Sonderschalungen aus Holz: Brückenschalung Hünnebeck / Harsco [57] (links); Tunnelschalung Hubert & Sohn [58] (rechts) .....	26
Abbildung 2-15: Semi-manuelle Fertigung eines 3D-Schalelements der Firma Peri [58] für das Aquatics Centre in London [59].....	27



Abbildung 2-16: Herstellung einer Sonderstützen-Stahlschalung mit Pilzkopf der Firma Robusta-Gaukel [56] (links), zusammengesetzte Stahlschalung (Mitte), fertige Pilzkopfstütze eines Parkdecks in Mödling bei Wien (rechts) [56] .....	27
Abbildung 2-17: CNC gefrästes Sonderschalungsteil aus Polyurethan Typ obomodulan® mit einer Dichte von 700 kg/m <sup>3</sup> (links); mit der Sonderschalung hergestelltes hochpräzises UHPC Bauteil einer Kassettendecke beim Ausschalen (rechts) [61] .....	29
Abbildung 2-18 Großdemonstrator des TailorCrete Projekts in Aarhus bei der Fa. Paschal Dänemark: Fertiges freigeformtes Demonstrationsobjekt aus Beton (links) [64], unzulässige Verformungen am Kontaktpunkt der unter dem Frischbetondruck verformten EPS Schalungskörper (Mitte) [65], System Doka Shape: GFK beschichtetes EPS montiert auf Holzträgerschalungen (rechts) [66] .....	30
Abbildung 2-19: Städel-Museum in Frankfurt: Fräsen von EPS-Hartschaumblocken durch die Firma Accentform Kunststoffverarbeitung [59]; Beschichtung mit 5 mm dickem Glasfaser-Kunststoff-Laminat; manuelles Nachbearbeiten der Schalung Foto Kloft; fertige Decke des Museums Foto Norbert Miguletz (v.l.n.r.) .....	30
Abbildung 2-20: Herstellung monolithischer Abwasser-Schachtunterteile: CNC gesteuertes Fräsen der Schalungskörper aus EPS mit dem System der B+S Peco-System (links), manuelles Nachschleifen der Oberfläche (rechts) © Fotos: H. Kloft .....	31
Abbildung 2-21: Herstellung monolithischer Abwasser-Schachtunterteile: Beschichten der gefrästen EPS Schalungskörper mit dem Trennmittel Betopro® WX-G (links), nach dem Abbinden der Schachtunterteile muss die EPS „Einwegschalung“ als Abfall entsorgt werden (rechts) © Fotos: H. Kloft .....	31
Abbildung 2-22: Elementierte organische Membranwand aus selbstverdichtendem Flow-Stone-Beton (Fa. Dyckerhoff) des Frankfurter „Cocoon Club“ (links), Serienfertigung der wenigen Grundmodule mittels Matrizen bei der Firma Villa Rocca (rechts), Entwurf 3deluxe Architekten / Tragwerksplanung OSD [72] .....	32
Abbildung 2-23: Prototyp für ein ultra-dünnes und stark gewelltes Betondach der Block Research Group unter der Leitung von Prof. Block und Dr. Tom Van Mele: Mechanisch gespanntes Drahtseil-Netz mit textiler Schalungshaut (links), Aufspritzen des Betons auf die mit Carbongelege als Bewehrung versehenen Schalung (Mitte), fertiges Betondach mit einer variierenden Betondicke von 3 cm an den Rändern und 12 Zentimetern an den Auflageflächen (rechts) [80] .....	34
Abbildung 2-24: Arbeitsablauf adaptive Schalungen (Adaptive Mould™ Workflow) nach [82] in vier Schritten (v.l.n.r.): 1. Mittels Adapa Tools wird die gekrümmte CAD Form segmentiert und es werden die Steuerungsdaten für die adaptiven Schalungen generiert, 2. Die Hubglieder der Aktuatoren stellen die gewünschte Form der Schalhaut ein und über eine Laserprojektion wird die Position der anzubringenden Seiten-Abschalungselemente angezeigt, 3. Das Material wie z. B. glasfaserverstärkter Beton kann aufgespritzt oder -gegossen werden, 4. Nach Erhärten des Materials kann das gekrümmte Bauteil von der adaptiven Schalung genommen werden. ....	34
Abbildung 2-25: Aufbau des durch Adapa patentierten adaptiven Schalungssystems: Doppelmembrane aus Silikonverschleißschicht (2 mm) und Tragschicht aus verstärktem ferromagnetischem Silikon (15–20 mm), Unterstützungssystem aus Kohlenstoffstäben, Magneten und Aktuatoren (links) des adaptiven Schalungssystems Typ Adaptive M400 Mould Adapa (Mitte) [82], Computervisualisierung des Konzepts einer vertikalen adaptiven zweischalig gekoppelten Betonschalung von Knaack (rechts) [81] .....	35
Abbildung 2-26: Prinzip des Prozessablaufes der wiederverwendbaren formgebenden Wachsschalung (Zero Waste Free-Form Formwork), welches unter der Leitung von Gramazio / Kohler an der ETH Zürich im TailorCrete Programm der EU (2009–2014) entwickelt wurde (links), Schema: zum Verbund zusammengesetzter Wachsschalungselemente, welche beidseitig in eine konventionelle Rahmenschalung zur Herstellung freigeformter vertikaler Betonwände eingesetzt sind (rechts) [84] © Gramazio / Kohler Research, ETH Zürich .....	36
Abbildung 2-27: Optimierter Teil des Prozessablaufes zur Randbearbeitung durch CNC Fräsen (links) © Gramazio / Kohler Research, CNC Fräsversuche am Wachs der Fa. Paramelt Typ MACO, durchgeführt am ITE (Mitte), mit gefügten Wachsschalungselementen hergestelltes gekrümmtes Betonelement (rechts) © Gramazio / Kohler Research .....	37
Abbildung 2-28: Scoop cast facade Masterseminar am ITE 2015: Projekt Floating Wall: Herstellung eines modularen Beton-Fassadenpanels mithilfe eines experimentellen, robotergestützten Schalungssystems auf Formsandbasis; Prozessschritte: Der Roboter gräbt bzw. schiebt mit einem Spachtel das Negativ der herzustellenden Geometrie aus dem Sand (1.v.l.), mit einem pneumatischen Stampfer wird die Oberfläche der Sandschalung verdichtet (2.v.l.), nach Auftragen des Betons wird die Rückseite des Bauteils vom Roboter glattgestrichen und überflüssiges Material wird entfernt (3.v.l.), erhärtetes Beton-Fassadenpaneel (4.v.l.) © Fotos ITE .....	38
Abbildung 2-29: Auf robotisch geformtem Formsand basierender Prozessablauf der Wachsschalung (Zero Waste Free-form Formwork) von Gramazio und Kohler (links), mittels eines Stampfers, welcher an einem Roboter befestigt ist, in Form gebrachter Formsand (Mitte), Abguss des Formsandes mit Wachs (rechts) © Gramazio / Kohler Research [87] .....	38

## 6. Quellenverzeichnis

Abbildung 2-30: Smart Dynamic Casting (SDC) von Gramazio / Kohler Research an der ETH Zürich (1. + 2. v. l.) [91], Dynamic Robotic Slip-form Casting von Lei Yu, Dan Luo, Weiguo Xu an der Architecture School, Tsinghua University, Beijing China und damit realisiertes Projekt in China (3.+4. v. l.) [92].....	40
Abbildung 2-31: Computer Visualisierung der robotisch aktiv geführten Schalungen, gegen welche robotisch geführt Spritzbeton aufgetragen wird (links), Action Cam Bilder des dazu 2017 am DBFL des ITE durchgeführten Versuches (rechts) © ITE .....	40
Abbildung 2-32: „Shotcrete 3D Printing“ (SC3DP) im Forschungsprojekt „Entwicklung einer robotergestützten Spritztechnologie zur schalungslosen generativen Fertigung komplexer Betonbauteile“ am DBFL des ITE: Druck einer Betonstütze mit Überhang (links), Druck einer gekrümmten Betonwand (rechts) © ITE .....	41
Abbildung 2-33: Zusammengesetzte Schalungen für Versuchskörper von aufgeweiteten, trocken gefügten, stabförmigen UHPC Stoßverbindungen einschl. unterer, mittels FDM gedruckter Aufweitung der Schalung (1.v.l) [96], mit der Schalung hergestellter Probekörper aus UHPC (2.v.l), im Seminar „print cast“ am ITE durch Studierende hergestellte kleinmaßstäbliche, komplexe Schalung und Betonkörper (3.v.l), großflächige mit dem bigrapONE mittels 8 mm Düse FDM gedruckte freigeformte Sonderschalung (4.v.l, oberhalb,) Abguss aus UHPC (4.v.l, unterhalb) © ITE .....	42
Abbildung 2-34: 3DPRINTCANALHOUSE Amsterdam: großformatige freigeformte, verlorene Schalung aus FDM gedrucktem thermoplastischen Kunststoff (links), mit Beton gefülltes Schalungselement (Mitte), Fehlstelle beim FDM Druck – wahrscheinlich aufgrund von thermisch bedingten Spannungen beim Abkühlen der großen thermoplastischen Strangdicken (rechts) © Fotos Mainka 2016.....	43
Abbildung 2-35: Extruder Druckverfahren von Wachsteilen mit dem System Solidscape® MAX: Druck von Wachsteilen für die Schmuckindustrie (blau –Modelliermaterial, violett – Stützmaterial (links), technischer Aufbau des Druckers (Mitte u. rechts) [100].....	44
Abbildung 2-36: Prinzip des Prozessablaufes zum 3D Drucken von Wachsschalungen für Betonbauteile auf Basis des FreeFAB Prinzips nach [102]: 1. Drucken des Wachses, 2. CNC Fräsen der Oberfläche, 3. Betonieren der Schalung, 4. Wachs abschmelzen und Recycling des Wachses, 5. Fertiges Betonbauteil (links), 3D gedruckte Schalung nach etwa 50 gedruckten Lagen (Mitte); kumulative Verzerrung im 3D Druck (rechts) © Laing O'Rourke. ....	46
Abbildung 2-37: Vergleich patentierter Prinzipien von Prozessabläufen zur Verwendung von CNC gefrästem schmelzbaren Wachs als Sonderschalung zum Gießen von Betonbauteilen: Verfahren zur automatischen Herstellung von Sonderteilen aus Beton oder Stahlbeton nach Dittmann – Anmeldejahr 1987 (vier Abbildungen übereinander – links) [104], Method for the manufacture of molds nach Ahonen – Anmeldejahr 1987 (drei Abbildungen übereinander – rechts) [105].....	48
Abbildung 2-38: FreeFab Verfahren: Roboterarm mit Zuleitung und Druckdüse, die flüssiges Wachs in Wachssträngen absetzt und damit Schalungen aus „Wachs Schichtweise als FDM druckt“ (links), Frässpindel, die das überschüssige Wachs aus dem Druckprozess der Schalung entfernt und die Oberfläche auf das finale Soll-Maß abfräst (Mitte), Herstellungsbeispiel für eine Schalung einer rippenverstärkten Betonplatte, bei der die Rippen dem optimalen Kraftfluss folgen (rechts), Bilder aus [106].....	50
Abbildung 3-1: Organigramm: Beispielhafte Zuordnung der häufigsten Wachsorten.....	56
Abbildung 3-2: „Molekulargewicht“ (mittlere molare Masse abhängig von den Kohlenwasserstoffkettenlängen) von Polyethylen im Verhältnis zum Anteil der Kristallinität (abhängig von der Geradlinigkeit bzw. Verzweigkeit der Kohlenwasserstoffketten). Darstellung der so synthetisch hergestellten Produkte mit entsprechend resultierenden mechanischen Eigenschaften aus [121], basierend auf [122]. ....	59
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Änderung des spezifischen Volumens mit der Temperatur bei amorphen und kristallinen Materialien, der Anstieg der Graden gibt den jeweiligen Wärmeausdehnungskoeffizienten wieder, aus [125] .....	61
Abbildung 3-4: Formänderungsverhalten eines amorphen Kunststoffs / Wachses (links) und teilkristallinen Kunststoffs / Wachses (rechts) aus [125].....	62
Abbildung 3-5: Last-Weg / Zeit-Diagramme: Grundlegendes plasto-elastisches Verhalten von Wachs bei konstanter Temperatur (links), beispielhaftes unterschiedliches plasto-elastisches Verhalten von drei verschiedenen Wachsen aus der Zahntechnologie bei variabler Belastung und unterschiedlichen Temperaturen (rechts) [127].....	63
Abbildung 3-6: Temperatur / Hydratationszeit-Diagramme: Versuch am ITE zur Messung der Entwicklung der Hydratationstemperatur an der Zwischenschicht vom einem Betonprobekörper (30 x 30 x 30 cm) und einer umlaufenden, 10 cm starken XPS Isolierschicht, UHPC (Typ UHPC ND-2,5) rot, Normal- bzw. Feinkornbeton C30/37 (etwa 400 kg/m³ Portland Zement PUR 4 N) schwarz .....	65
Abbildung 3-7: Perspektivische Visualisierung der Referenzgeometrie, Durchmesser 100 mm / Höhe 30 mm, zur Überprüfung der Fräsbarkeit unterschiedlicher Wachse: geometrische Bereiche: 1) amorphe, parabelförmige, unidirektional gekrümmte Flächen, 2) mit unterschiedlichen Winkeln von 5° auf 60° zulaufender scharfer Grat, 3) Stufen, Zylinderbohrungen und Dreieckszylinder mit scharfen Kanten .....	71

Abbildung 3-8: Beispiele für die unterschiedlichen Gruppen von Wachs, an welchen die Zerspanungsfähigkeit (Fräsbarkeit) mittels einer Referenzgeometrie untersucht wurde: 1. geeignetes, also gut fräsbares bzw. spanendes Wachs, Fa. Tromm ConCormWax CFW (links), 2. Wachs ist für die spanende Bearbeitung nicht geeignet, da zu spröde, VÖLPKER 6628 (Mitte), 3. Wachs ist für die spanende Bearbeitung nicht geeignet, da zu klebrig, H&R Wicrofin 74 (rechts).....	72
Abbildung 3-9: Gefräste Referenzkörper (inkl. Vergleichsprobe) der untersuchten Wachse: links zu spröde (Wachs KW5023, nur Vergleichsprobe dargestellt), mittig prinzipiell für die Fräsbearbeitung geeignet und rechts zu klebrig (Wachs MACO, nur Vergleichsprobe und SH nicht dargestellt).....	72
Abbildung 3-10: Vorbereitung des Schmelztiegels mit 10 mg CFW Wachs (links), Dynamisches Differenzkalorimeter (DSC) Typ Netzsch DSC 204 am Institut für Technische Chemie (rechts) .....	74
Abbildung 3-11: Wachs CFW - DSC Graph der aufgenommenen und abgegeben Wärmeenergie je Temperatur, rot Aufheizung, blau Abkühlung.....	75
Abbildung 3-12: Wachs PW 3146 - DSC Graph der aufgenommenen und abgegeben Wärmeenergie je Temperatur, rot Aufheizung, blau Abkühlung.....	75
Abbildung 3-13: Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Pausch THB-10 bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung vom Wachs PW 3146.....	78
Abbildung 3-14: Diagramm: thermische volumenspezifische Ausdehnung, zur jeweiligen gemittelten Rohdichte und Bezugstemperatur 20°C normiert .....	80
Abbildung 3-15: Mit verschiedenen Methoden hergestellte Wachsprobekörper am Beispiel von CFW (von l. nach r.): in kalte Form gegossener Probekörper / in erhitzte Form gegossener Probekörper / Herstellung wie zweiter Probekörper mit anschließendem Pressen bei 50°C (Onset-Wert) (links), verwendete Biegezug Prüfmaschine des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig am Fachgebiet Baustoffe (rechts) .....	82
Abbildung 3-16: Biege-Spannungs-Dehnungs-Diagramm der untersuchten Wachse (aus Mittelwerten der gegossenen Probekörper) .....	83
Abbildung 3-17: Erste Druckfestigkeitsprüfung der Wachse mittels Werkstattpresse, Kraftmessdose und analogen Wegmessuhren am ITE (links), fehlerhafter Probekörper aus PW 3139 nach dem Ausschalen (rechts) .....	84
Abbildung 3-18: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm der Wachse CFW, PW 3146 und RC 252 aus erster Druckfestigkeitsprüfung am ITE.....	85
Abbildung 3-19: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm der Wachse CFW, PW 3146, RC 252, RC 253, SSW3 und VOE 6548-v2 bei 20°C und einer Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min (A) und 5 mm/min (B) .....	86
Abbildung 3-20: Wachsprobekörper am Ende der jeweiligen Druckversuche (v.l.n.r.): CFW und PW 3146 zeigen eine plastische Verformung ohne Bruch bei 25 % Stauchung, RC 252 und RC 253 zeigen eine plastische Verformung mit leichten Rissen und Abplatzungen bei 25 % Stauchung, VOE 6548-v2 und SSW 3 versagen durch Bruch bei etwa. 2 % bzw. 3 % Stauchung. ....	87
Abbildung 3-21: Hergestellte Probekörper: a) 6 Stück CFW, angereichert mit 40 Gew- % Füllstoff (Terephthalsäure) (links), b) 3 Stück CFW, angereichert mit 20 Gew- % Füllstoff (Rohcellulose Arbocel C100) (Mitte oben), c) 6 Stück reines CFW ohne Füllstoff (Mitte unten), d) 3 Stück reines PW 3146 ohne Füllstoff (rechts oben), e) 6 Stück PW 3146, angereichert mit 40 Gew- % Füllstoff (Terephthalsäure) (rechts unten) .....	88
Abbildung 3-22: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm der reinen CFW Wachsproben bei 8, 20, 30 und 40°C, Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min (B) .....	89
Abbildung 3-23: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm der PW 3146 Wachsproben (werkseitig angereichert mit 40 % Füllstoff Terephthalsäure) bei 8, 20, 30 und 40°C, Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min (B).....	89
Abbildung 3-24: Druckspannungs-Dehnungs-Diagramm bei 20°C der Wachsproben PW 3146 und CFW jeweils mit und ohne Füllstoff (Terephthalsäure) und CFW mit Füllstoff (Rohcellulose), Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min (B).....	91
Abbildung 3-25: Zeit-Dehnungs-Diagramm zum plasto-elastischen Verhalten (Kriechen) der Wachse PW 3146 (werkseitig gefüllt mit 40 % Füllstoff Terephthalsäure), CFW sowie CFW 40% T und CFW 20% C, gemessen bei 20°C .....	92
Abbildung 3-26: Aluminiumform zur Herstellung der Zugprobekörper (links), Prüfmaschine, Versuchsaufbau (Mitte) und gerissener Probekörper (rechts) .....	94
Abbildung 3-27: Probekörper 1+2 CFW, 3+4 CFW angereichert mit 40 % Füllstoff (Terephthalsäure), 5+6 PW 3146 werkseitig mit 40 % Terephthalsäure als Füllstoff versetzt (links), Probehalter des temperierten Drei-Punkt-Biegeversuchs (Mitte), Funktionsprinzip DMTA-System Typ Mettler: (1) LN <sub>2</sub> Einlass / Auslass, (2) Heizelement, (3) Probenhalter, (4) Probe, (5) Anregungsstange, (6) Wegsensor (rechts) aus [142] .....	95
Abbildung 3-28: Temperatur-Speichermodul G' und Verlustmodul G''-Diagramm der Wachse PW 3146, CFW und CFW + T40% mittels DMTA.....	96
Abbildung 3-29: Temperatur-Verlustfaktor Tangens Delta (tan δ)-Diagramm der Wachse PW3146, CFW und CFW T40% aus Verhältnis von E' (Speichermodul) und E'' (Verlustmodul).....	96

## 6. Quellenverzeichnis

Abbildung 4-1: Wachsblock aus CFW Wachs (Abmessungen 300 x 300 mm, Höhe 100 mm), gegossen in eine Form aus beschichteten Furniersperrholzplatten (20°C) mit einer anschließenden schnellen Abkühlung über eine Stunde bei 0°C Umgebungstemperatur, Draufsicht mit starker Rissbildung am rechten Rand (links), Ansicht des mittig aufgesägten Blocks (rechts) .....	99
Abbildung 4-2: Wachsblock aus CFW Wachs (Abmessungen 300 x 300 mm, Höhe 100 mm), gegossen in eine Form aus beschichteten Furniersperrholzplatten (40°C) mit einer anschließenden langsamen Abkühlung über 12 Stunden von zuerst 60°C auf 20°C Umgebungstemperatur, Draufsicht (links), Ansicht des mittig aufgesägten Blocks (rechts) .....	100
Abbildung 4-3: Guss eines Wachsblocks aus CFW Wachs (Abmessungen 1200 x 400 mm, Höhe 100 mm), gegossen in eine Form aus beschichteten Furniersperrholzplatten (40°C) mit einer anschließenden langsamen Abkühlung über 12 Stunden von zuerst 60°C auf 20°C Umgebungstemperatur (links), hergestellter abgekühlter Wachsblock, der eine ungewollte Krümmung / Verformung aufweist (oben), Prinzipskizze für die Verzugsproblematik durch einseitige Bearbeitung von Wachsen mit inneren Spannungen – Druckbereich im Material gelb markiert (Mitte), Verzug nach einem Entfernen des gelben Bereichs durch CNC Fräsen (unten) .....	101
Abbildung 4-4: Wachsinjektion – Versuchsaufbau zur Injektion von Wachs zur Erstellung eines Wachsblocks mit den Abmessungen 500 x 500 x 500 mm: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips; blaue Pfeile – Abkühlrichtung / gelbe Pfeile – Fließrichtung des heißen flüssigen Wachses (links), Versuchsaufbau mit Form aus beschichteten Furniersperrholzplatten, in dessen Kern über eine beheizte Rohrleitung heißes flüssiges Wachs mit 85°C aus dem oberen Schmelzkessel über hydrostatischen Druck injiziert wird (rechts) .....	102
Abbildung 4-5: Wachsinjektion – nach dem Abkühlen ausgeschalteter Wachsblock mit planaren Seiten und Abmessungen 500 x 500 x 500 mm (links), aufgesägter Wachsblock mit starker Hohlraumbildung im Kern (rechts) .....	103
Abbildung 4-6: Verguss von Wachskugeln: Schalung mit eingefüllten Kugeln aus CFW (links), Vergießen der Kugeln mit 85°C heißem CFW Wachs (Mitte), Plangefräster Probekörper mit erkennbarer Lunkerbildung und kleinen Rissen (rechts) .....	104
Abbildung 4-7: Mit heißem CFW vergossene kleinformatige CFW-Wachsböcke mit den Abmessungen 200 x 100 x 50 mm, welche durch sehr schnelles Abkühlen in einer Stahlform hergestellt wurden (links), am stufenförmig abgefrästen Wachsböck mit den Abmessungen 500 x 500 mm und einer Höhe von 120 mm sind diverse Risse zwischen den vergossenen kleinformatigen CFW Wachsböcken erkennbar (rechts) .....	105
Abbildung 4-8: Gießen von Wachstafeln in einer gekühlten Stahlschalung (links), hergestellte Wachstafel aus CFW Wachs mit den Abmessungen 1000 x 600 mm mit einer Dicke zwischen 50 und 48 mm (Mitte), Zuschnitt der Wachstafeln mit einer konventionellen Handkreissäge (rechts) .....	106
Abbildung 4-9: Beidseitiges Hobeln der zugesägten CFW Wachstafeln mit einem konventionellen Dickenhobel auf eine Sollstärke von 45 mm (links), einseitig gehobelte Wachstafel (rechts) .....	106
Abbildung 4-10: Mit heißem CFW Wachs vergossene gehobelte CFW Wachstafeln mit einer Dicke von 45 mm und unterschiedlichen Abständen zueinander (links), am stufenförmig abgefrästen Wachsböck mit den Abmessungen 500 x 500 mm und einer Höhe von 120 mm sind Risse bei mittleren und großen Fugenabständen zwischen den vergossenen gehobelten CFW Wachstafeln erkennbar (rechts) .....	106
Abbildung 4-11: Verguss der gehobelten Wachstafeln mit einer Dicke von 45 mm und einem exakten Fugenabstand von 5 mm mit 90°C heißem CFW (links), Überprüfung der Temperatur (Mitte), nach dem Abkühlen des CFW Wachses ausgeschalteter Wachsböck mit den Abmessungen 500 x 500 mm und einer Höhe von 150 mm (links) .....	107
Abbildung 4-12: Am stufenförmig abgefrästen Wachsböck mit den Abmessungen 500 x 500 mm, einer Höhe von 120 mm und einer Vergussfugenbreite von 5 mm sind nur Risse an den Außenseiten der äußeren vergossenen, gehobelten CFW Wachstafeln erkennbar (links), Wachsprobekörper, welcher quer zu den Vergussfugen aus einem Wachsböck herausgesägt wurde: Biegebelastung zur Überprüfung des Verbundverhaltens an den Vergussfugen .....	107
Abbildung 4-13: In einer gekühlten Stahlschalung gegossene und anschließend aufgesägte CFW Wachstafeln mit einer Dicke von 100 mm und deutlich zu erkennender Rissbildung im Kern über die gesamte Höhe (links), industrielle Wachstafelgießmaschine bei der Firma Tromm (rechts) .....	108
Abbildung 4-14: Strangpressmaschine zur Herstellung von Altarkerzen Ø = 100 mm aus feinen Wachsspänen in einer Kerzenfabrik .....	108
Abbildung 4-15: Großpressversuch zum Pressen von Wachsböcken aus feinen CFW Wachsspänen (links), Einfüllen der Wachsspäne in die Pressform (oben), gepresster Wachsböck Ø = 1 m, Höhe 50 cm (unten) .....	109
Abbildung 4-16: Zugversagen des Wachses (schüsselartiger Ausbruchkegel) bei der Rampa-Muffe mit einem Außendurchmesser D = 18,5 mm bei einer Zugkraft von 2,4 kN (links), Schubversagen (Abscheren der Wachsfanken) und kleiner Ausbruchkegel bei der Holzbauschraube mit einem Außendurchmesser D = 8,0 mm bei einer Zugkraft von 1,9 kN (rechts) .....	110

Abbildung 4-17: Beispiel einer Ausschalhilfe zum Lösen geometrisch komplexer UHPC Maschinengestelle aus ihrer Stahlschalung: eingefahrener Stahlstempel (Auswerfer), der das erhärtete UHPC Bauteil von der Schalung abdrücken kann (links), manueller hydraulischer Wagenheber unter der Schalung zum Betrieb des Stahlstempels (rechts) .....	111
Abbildung 4-18: Geometrie der Aussparung für die entwickelte Ausschalhilfe, welche in die Wachsschalung eingefräst und mit einer Metallronde abgedeckt wird: Perspektive (links), Schnitt mit Maßen [mm] (Mitte), Anwendungsbeispiel in einer Wachsschalung, bei welcher die Aussparung mit einer Metallronde in Form einer 2-Cent-Münze verschlossen wurde (rechts) .....	112
Abbildung 4-19: Wachsschalung, in die im ersten Schritt Wasser und Druckluft in die Trennschicht Wachs / UHPC über die Ausschalhilfe über rückwärtig eingeschraubte Rampa-Muffen Außen- $\varnothing D = 18,5$ mm eingepresst wird (links), im zweiten Schritt werden M10 Maschinenschrauben in die Rampa-Muffen eingedreht und das UHPC Bauteil wird von der Wachsschalung abgedrückt (rechts) .....	112
Abbildung 4-20: Werkzeugauswahl für die Versuchsreihen zum Planfräsen: Beispiel für Walzenstirnfräser (links), Stahlbearbeitungs-Messerkopffräser $\varnothing = 100$ mm (Mitte) und Holzbearbeitungs-Messerkopffräser $\varnothing = 90$ mm (rechts) .....	114
Abbildung 4-21: Gefertigte Nuten mit dem Entformungswinkel $4^\circ$ (oben links), digitale Vermessung der gefertigten Nuten mit GOM Inspect (unten links), verwendete Schafffräser Durchmesser $d = 16$ mm mit (oben rechts) und ohne DLC Beschichtung (unten rechts) © IWF .....	115
Abbildung 4-22: Auf einer Wachsschalung mit Nuten mit Entformungswinkel gegossener UHPC Probekörper vor Zugversuch (links), nach Zugversuch (rechts) .....	116
Abbildung 4-23: Wachsschalungen mit Scan-Referenzpunkten nach dem Abguss mit UHPC mit einachsig gekrümmten Flächen, die durch Abzeilen mit einem Vollradiusfräser ( $\varnothing = 10$ mm jeweils auf der linken Seite und $\varnothing = 20$ mm jeweils auf der rechten Seite) mit unterschiedlichen Fräsbahnabständen $x = 1$ mm, $x = 0,5$ mm und $x = 0,1$ mm (jeweils je Mulde v. u. n. o.) hergestellt wurden: CFW Wachs (links), PW3146 (rechts) .....	117
Abbildung 4-24: UHPC Abgüsse mit Scan-Referenzpunkten der Wachsschalungen aus Abbildung 4-23, Abguss auf CFW (links), Abguss auf PW 3146 (rechts) .....	117
Abbildung 4-25: Details der Oberflächen vom UHPC Abguss (Abbildung 4-24, links), hergestellt mit einem Vollradiusfräser $\varnothing = 20$ mm mit unterschiedlichen Fräsbahnabständen $x$ : $x = 1$ mm – Rillen optisch und haptisch zu erkennen (oben), $x = 0,5$ mm – Rillen nur haptisch feststellbar (Mitte), $x = 0,1$ mm – optisch und haptisch glatt (unten) .....	118
Abbildung 4-26: Beispiele für verschiedene Typen von Formenbausteinen .....	122
Abbildung 4-27: Digitale CAD Modelle der Wachsschaltafeln: Block A (links), Block B (Mitte), Block C parametrisch (rechts) .....	122
Abbildung 4-28: Einfaches visuelles Programm, um mit Grasshopper im 3D CAD Programm Rhinoceros der Firma McNeel eine parametrisch strukturierte Oberfläche zu erzeugen (links), mögliches parameterabhängiges Ergebnis (rechts) .....	122
Abbildung 4-29: Beispiel Fräsbahnplanung Wachsschaltafel Block A: Schruppbearbeitung mit Schafffräser $d = 16$ mm, $n = 9776$ U/min, $v_f = 5024$ mm/min (links); Kopierfräser (Vollradiusfräser) $d = 7$ mm, $n = 10004$ U/min, $v_f = 1120$ mm/min für die Bearbeitung der stark gekrümmten Freiformfläche des Formenbausteins Nr. 7.2 (rechts) .....	123
Abbildung 4-30: Am IWF gefertigte Wachsschaltafeln Block A (links), Block B (Mitte), Block C (rechts) .....	123
Abbildung 4-31: Betonieren mit UHPC ND-2,5 (Typ Dyckerhoff Nanodur – Tabelle 5): Block A Einbringen über Rinne zum Entlüften (links), Block B Einbringen durch direktes Gießen aus Eimer (Mitte), von der Wachsschalung getrennter Block B direkt nach dem Entschalen (rechts) .....	124
Abbildung 4-32: Wachsschalung Block A nach dem Ablösen vom UHPC (links), UHPC-Abguss des Blocks A (rechts) .....	125
Abbildung 4-33: Wachsschalung Block B nach dem Ablösen vom UHPC (links), UHPC-Abguss des Blocks B (rechts) .....	125
Abbildung 4-34: Wachsschalung Block C nach dem Ablösen vom UHPC (links), UHPC-Abguss des Blocks C (rechts) .....	125
Abbildung 4-35: Abweichungen zwischen Scandaten des Wachsblocks A und dem CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts) in mm .....	127
Abbildung 4-36: Abweichungen zwischen Scandaten des Wachsblocks B und dem CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts) in mm .....	127
Abbildung 4-37: Abweichungen zwischen Scandaten des Wachsblocks C und dem CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts) in mm .....	127
Abbildung 4-38: Abweichungen zwischen Scandaten der Wachsböcke A (links), B (Mitte) und C (rechts) vor und nach dem Abguss mit UHPC in mm .....	128
Abbildung 4-39: Abweichung zwischen Scandaten des hergestellten UHPC-Abgusses Block A und CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts) .....	129



Abbildung 4-40: Abweichung zwischen Scandaten des hergestellten UHPC-Abgusses Block B und CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts) .....	129
Abbildung 4-41: Abweichung zwischen Scandaten des hergestellten UHPC-Abgusses Block C und CAD-Datensatz in mm: Aufsicht (links), Perspektive (rechts) .....	129
Abbildung 4-42: Materialbruttokostenansätze für CNC gefräste Schalungen im Vergleich: *1 POM – Polyoxymethylen (W. Max Wirth GmbH), *2/*3 PU – Polyurethan, Dichte 1200 / 700 kg/m <sup>3</sup> (OBO-Werke GmbH), *4 EPS PS60, Dichte 60 kg/m <sup>3</sup> (Metz EPS), *5 XPS – Extrudierter Polystyrol-Hartschaum, Dichte 40 kg/m <sup>3</sup> (OBI), *6 EPS PS40, Dichte 40 kg/m <sup>3</sup> (Schurg GmbH), *7 CFW bei 50-facher Wiederverwendung (WAX <sub>JE50</sub> ), *8 CFW, reine Materialkosten (WAX <sub>inv</sub> ) .....	130
Abbildung 4-43: Konventionelle Herstellung von Schalungen für Beton-Fertigteilbalkone aus beschichteten Multiplexplatten bei der Firma HIEBER Betonfertigteilewerk GmbH.....	133
Abbildung 4-44: grau: digitales 3D Modell des Muster-Fertigteilbalkons und gelb: mittels der Funktion Boolesche Differenz im CAD Programm Rhino der Firma McNeel erzeugtes digitales 3D CAD Schalungsmodell (links), Seitenansicht des Schalungsmodells unter Angabe einer Auswahl relevanter Neigungswinkel und Maße in mm (rechts) .....	134
Abbildung 4-45: Fräsbahnplanung (links), fertiges, mit dem DBFL des ITE gefrästes Wachs-Schalungselement aus ConFormWax (rechts) .....	134
Abbildung 4-46: Betonierung des mit einer Randabschalung und einem Bewehrungskorb versehenen Wachs-Schalungselements (links), Abheben des betonierten Muster-Fertigteilbalkons (rechts) .....	135
Abbildung 4-47: unbeschädigtes Wachs-Schalungselement nach dem Ausschalen (links), Muster-Fertigteilbalkon (rechts) .....	135
Abbildung 4-48: Gemessener Temperaturverlauf (T) am zusätzlichen baugleichen Referenz-Musterbalkon, welcher erst nach 42 Std. ausgeschalt wurde; schwarz: T gemittelt aus zwei Punkten im Kern des Balkons; braun: T an der Grenzschicht zwischen Wachsschalung und Beton; orange: T in der Wachsschalung jeweils 3, 6 und 9 cm unterhalb der Grenzschicht; hellblau: T in der Versuchshalle .....	136
Abbildung 4-49: Herstellung eines Schalungskörpers aus CFW für monolithische Abwasser-Schachtunterteile aus Beton am DBFL Großgerät – „Digital Building Fabrication Laboratory“ des ITE: Schruppfräsen des Wachsblocks (links), Schlichtfräsen des Wachsblocks (Mitte), fertiger CFW Schalkörper (rechts).....	137
Abbildung 4-50: In Systemschalung mit System-Rohranschlussschalungen für Abwasser-Schachtunterteile eingebauter CFW Schalkörper (links), Füllen der Schalung mit UHPC (rechts) .....	137
Abbildung 4-51: Hergestelltes Abwasser-Schachtunterteil aus UHPC nach dem Ausschalen mit Druckluft (links), unversehrter CFW Schalkörper nach dem Ausschalen (rechts) .....	138
Abbildung 4-52: CAD Visualisierung des Demonstrators UNI-CON <sup>2</sup> (links), fertig hergestellter Demonstrator UNI-CON <sup>2</sup> (rechts).....	138
Abbildung 4-53: Digitales 3D Modell des Stützenkopfes, dabei in Gelb: mittels der Funktion Boolesche Differenz im CAD Programm Rhino der Firma McNeel erzeugtes digitales 3D CAD Schalungsmodell (links), Fräsbahnplanung am IWF für die Herstellung der CFW Wachsschalungen (rechts) .....	139
Abbildung 4-54: CFW Wachsschalungsmodule des Stützenkopfes beim Zusammenbau am iMBM (links), Ausschalen des Stützenkopfes (unten), Fügen des Stützenkopfes mit den Deckenplatten mittels hochpräziser Trockenfügungen [62] (oben) .....	139
Abbildung 4-55: Prinzip des Prozessablaufes für die Herstellung von (dünnwandigen, hohlen) Betonbauteilen mithilfe von Verdrängungskörpern (Hohlraum-Wachsschalungen) aus Wachs (gelb) .....	140
Abbildung 4-56: Hohle und damit leichte Knochen von Vögeln (1. v. l.), pneumatische kugelförmige Verdrängungskörper Cobiax Eco-Line (2. v. l.), abgeflachte rotationssymmetrische Verdrängungskörper Cobiax Slim-Line (3. v. l.) [150], Verdrängungskörper aus EPS im Phaeno Wolfsburg (4. v. l.) .....	141
Abbildung 4-57: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Mindestbetondeckung über einem zylindrischen Wachs-Verdrängungskörper: schematische Darstellung und Positionsbeschreibung der Temperaturmesspunkte (links), hergestellte Versuchsschalung vor dem Einfüllen des UHPC und Anbringen der Dämmung (rechts).....	142
Abbildung 4-58: Gerissene UHPC Versuchskörper: Außendurchmesser 140 mm (links) und Außendurchmesser 160 mm (rechts).....	142
Abbildung 4-59: Schematische Darstellungen eines Ausschnitts: Sprengwirkung des Wachses im Kontinuum (gelb) bei Erwärmung des Betonkörpers von außen (links), Prinzip des Lösungsansatzes zum Abschmelzen des Wachses mit heißem Wasser (rechts); stark vereinfachte Darstellung des erwarteten Temperaturverlaufes über den jeweiligen Querschnitt (unten) .....	143
Abbildung 4-60: Realisierung des Versuchsaufbaus am Beispiel des Versuchskörpers Außendurchmesser 180 mm (links), schematische Darstellung des gewählten Versuchsaufbaus zum Ausspülen der Verdrängungskörper aus Wachs mittels heißen Wassers (rechts) .....	144

- Abbildung 4-61: Durch Ausspülen mit heißem Wasser vom Wachs befreite UHPC Versuchskörper (links): Außendurchmesser 180 mm – ungerissen (Mitte), Außendurchmesser 120 mm – gerissen (rechts) ..... 144
- Abbildung 5-1: Prinzip eines unbearbeiteten Wachs-Schalungselements, bestehend aus Stahl-Verbindungseinheiten und dem aufgespressten, individuell fräsbaaren Wachstrohling (links), Prinzip des vollautomatisierten Fertigungsverfahrens für eine modulare Wachsschalung: (1) Pressen der Wachsspäne zu Blöcken auf eine Stahl-Verbindungseinheit, (2) CNC Fräsen der Form, (3) Zusammenbau der modularen Schalung, (4) Ausbetonieren der Schalung, (5) Wachs Recycling, z. B. durch Schreddern / Mahlen © ITE..... 149

## 7 Werdegang



Jeldrik Mainka (\*1979 in Braunschweig) studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Berlin und schloss sein Studium dort 2007 mit seiner Diplomarbeit an der Bundesanstalt für Materialprüfung ab. Von 2008 bis 2011 arbeitete er in der Kalkulation, anschließend in der Bauleitung und später als Design-Projektmanager für das Bauvorhaben „Zoofenster Berlin“, einem 32-geschossigen Stahlbeton-Hochhaus, welches das schlüsselfertige 5-Sterne-Hotel „Waldorf-Astoria-Berlin“ beherbergt.

Motiviert durch die gute Zusammenarbeit mit den Architekten und dem Interesse aus der Vertiefungsrichtung „Betontechnologie“ begann er 2011 seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter für Forschung und Lehre bei Prof. Dr. Kloft am ITE, dem Institut für Tragwerksentwurf an der Technischen Universität Braunschweig.

Neben der Durchführung von Lehrveranstaltungen wie u. a. Tragwerkslehre, Tragwerksentwurf und „Design und Bau eines Möbels aus Hochleistungsbeton“ war er Projektkoordinator eines Forschungsprojekts zwischen dem ITE und dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Abt. Baustoffe im DFG Schwerpunktprogramm 1542: „Leicht Bauen mit Beton“.

Von Ende 2014 bis Ende 2016 war er Projektleiter eines weiteren DFG Forschungsprojekts zwischen dem ITE und dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) mit dem Titel: Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions- Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Betonbauteilen. Von 2015 bis 2017 war er außerdem verantwortlich für die Realisierung und den Betrieb des neuen Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL). Seit Anfang 2018 ist er stellvertretender Geschäftsführer des ITE und Koordinator für Forschungsprojekte.

E-Mail: [jeldrikmainka@gmail.com](mailto:jeldrikmainka@gmail.com)

## **8 Anhang**

Anhang A: Liste der geprüften Patente

Anhang B: Technische Datenblätter der Wachse

Anhang C: Überprüfung der Fräsbarkeit von unterschiedlichen Wachsen

Anhang D: Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) von Wachsen

Anhang E: Rohdichte und thermische volumenspezifische Ausdehnung von Wachsen

Anhang F: Biegezugversuche Wachse

Anhang G: Auszugsversuche Verbindungs- und Verankerungsmittel im Wachs

Anhang H: Formenbausteinkatalog

## Suche durch Jeldrik Mainka

ITE Institut für  
Tragwerksentwurf TU  
Braunschweig

Suchstring der Expertenrecherche auf <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/>:

Bl= ((Wachs ODER Paraffin ODER Montanwachs ODER Mineralwachs ODER Mikrowachs ODER Polyethylenwachs ODER Naturwachs ODER Industriegewachs) UND (Schalung ODER Negativform ODER Verschalung) UND (Beton ODER UHFB ODER UHPFRC ODER Leichtbeton))



NR:	Veröffentlichungs-Nummer	Titel	Relevanz für Recherche / Kommentar ITE	Recherchierbarer Text URL
1	DE000000271247A	[DE] Beschichtung von Betonkörpern	Keine Relevanz - Beschichtung von Betonkörpern	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
2	DE000000695137A	[DE] Spannen von Stahlbewehrung	Keine Relevanz - spannen von stahlbewehrung von 1937	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
3	DE000000714904A	[DE] Verfahren zur Verbesserung von Betonsichtfläachen	Keine Relevanz - Vorbehandlung der zu verwendenden Schalungsbretter mit Zinksalzen,	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
4	DE000000718315A	[DE] Unschädlichmaschinen zeitweilig erfolgender Schwitzwasserbildung auf Rohrleitungen, Behaltern, Mauerwerk oder Beton	Keine Relevanz -1938	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
5	DE000000746280A	[DE] Betonentschalungsmittel	gering Relevanz -1941 (Schalöl)	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
6	DE000000767820A	[DE] Betonschalungsfluessigkeit, insbesondere fuer metallische Schalungsformen	gering Relevanz -1940 (Schalöl)	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
7	DE000000809533B	[DE] Verfahren zum Herstellen von Spannbetonkoerpern	gering Relevanz -1940 (Schalöl)	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
8	DE000000961303B	[DE] Schalen- oder hohlkugelfoermige Baukonstruktion	keine Relevanz - einer an sich bekannten aufblasbaren Ballonform aus Gummi, gummiertem Textilgewebe od. dgl. die innere Gipschicht aufgetragen 1954	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
9	DE000001197915A	[null] Verfahren und Fertigteilsegment zum Herstellen der Auskleidung von in Schildbauweise vorzu-treibenden Tunneln, Stollen oder aehnlichen Bauwerken	keine Relevanz- vorzu-treibenden Schildbauweise Tunneln, Sto	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
10	DE000001197915B	[DE] Verfahren und Fertigteilsegment zum Herstellen der Auskleidung von in Schildbauweise vorzu-treibenden Tunneln, Stollen oder aehnlichen Bauwerken	siehe #09 keine Relevanz- vorzu-treibenden Schildbauweise Tu	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
11	DE000001211098A	[null] Verfahren zum Beeinflussen der Oberflaachenstruktur von Betonmassen	mittlere Relevanz - plastischen Oberflächenstruktur an Betonmassen, insbesondere Sichtbetonmassen, mit Hilfe einer zwischen Schalung und Betonmasse eingefügten, am Beton nichthaftenden folienartigen Zwischenlage aus Papier, Karton oder Pappe 1960	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
12	DE000001211098B	[DE] Verfahren zum Beeinflussen der Oberflaachenstruktur von Betonmassen	siehe #11	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
13	DE000001261153A	[null] Drehgelenk mit zwei gewoelbten Gelenkgleitflaachen fuer Baukonstruktionsteile, insbesondere Bruecken	Keine Relevanz - Stahlteile für Brücken Parafin nur schmiermittel 1965	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
14	DE000001459309A	[DE] Anorganischer,thermisch und akustisch isolierender Formhohlstein zur Bildung von monolithischem Mauerwerk,Verfahren zu dessen Herstellung und Giessform zur Ausfuehrung des Verfahrens	keine Relevanz verfahren dient zur herstellung von Betonsteinen 1963	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
15	DE000001481940U	[DE] Elektrische Waermebehandlung von Baustoffen	keine Relevanz - geht um Harken	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
16	DE000001667013A	[DE] Elektrische Waermebehandlung von Baustoffen	keine Relevanz -heizfilm dient lediglich zur waermebehandlung vom beton 1667	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
17	DE000001771010A	[DE] Verfahren zum Verbessern der physikalischen Eigenschaften von Papier und Pappe	keine Relevanz- verfahren zur ertüchtigung von papier für auskleidung von Schalungen 1968	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
18	DE000001903550A	[DE] Verfahren und Vorrichtung zur Errichtung von mehrstoeckigen Bauten durch das paketweise Anheben von an der Baustelle vorgefertigten Deckplatten und Dachkonstruktionen,unter Verwendung von Montage- ...	keine Relevanz - parafin lediglich schmiermittel 1968	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
19	DE000001925626U	[DE] BAUSATZ ZUR ERNEUERUNG VON TREPPEN.	keine Relevanz - 1965	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
20	DE000001948656U	[DE] EINLAGE ZUR VERWENDUNG BEI DER HERSTELLUNG VON WASCHBETON.	keine Relevanz - 1966	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
21	DE000001949711A	[DE] Fluessiger Sprengstoff und seine Anwendung zum Aufbrechen von geologischen Formationen	keine Relevanz - 1970	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
22	DE000001949711B	[DE] FLUESSIGER SPRENGSTOFF UND SEINE ANWENDUNG ZUM AUFBRECHEN VON GEOLOGISCHEN FORMATIONEN	keine Relevanz - 1970	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
23	DE000001949711C	[DE] Flussiger Sprengstoff und seine An wendung zum Aufbrechen von geologischen Formationen	keine Relevanz - 1970	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
24	DE000001952548U	[DE] AUFHAENGEVORRICHTUNG FUER BETONKOERPER OD. DGL.	mittlere Relevanz - wachs dient lediglich zum schutz vor eindringendem Beton nicht zur formung des Betons - 1966	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
25	DE000001964165A	[DE] Verfahren zur Herstellung von Formen und nach diesem Verfahren hergestellte Formen	keine Relevanz - stahl Spritzgussformen /beton lediglich als hilfskonstruktion 1970	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
26	DE000001964165B2	[DE] VERFAHREN ZUM HERSTELLEN VON FORMEN ODER FORMHAELFTEN	keine Relevanz -eine Metallschale von einem Modell abzuformen und dann die Schale zu hinterfütern- siehe auch #25 -1969	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
27	DE000001964165C3		keine Relevanz -eine Metallschale von einem Modell abzuformen und dann die Schale zu hinterfütern- siehe auch #25 -1969	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
28	DE000001964166A	[DE] Verfahren zur Herstellung von Formen	keine Relevanz -eine Metallschale von einem Modell abzuformen und dann die Schale zu hinterfütern- siehe auch #25 -1969	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>



NR:	Veröffentlichungs-Nummer	Titel	Relevanz für Recherche / Kommentar ITE	Recherchierbarer Text URL
29	DE000001964275A	[DE] Verfahren zur Herstellung von geteilten Formen	keine Relevanz -eine Metallschale von einem Modell abzuformen und dann die Schale zu hinterfüllen- siehe auch #25 -1969	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
30	DE000001966932A1	[DE] VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON FORMEN UND NACH DIESEM VERFAHREN HERGESTELLTE FORMEN	keine Relevanz -eine Metallschale von einem Modell abzuformen und dann die Schale zu hinterfüllen- siehe auch #25 -1969	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
31	DE000001990172U	[DE] Papierbogen zum Einlegen in Formen bei der Herstellung von Waschputz bzw Waschbetonplatten	keine Relevanz -1968	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
32	DE000001997248U	[DE] EINLAGE FÜR FORMEN BEI DER HERSTELLUNG VON WASCHPUTZ- BZW. WASCHBETONPLATTEN.	keine Relevanz -1974	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
33	DE000002039651A	[DE] GIPS- ODER ZEMENT-ZUSAMMENSETZUNGEN SOWIE DARAUS HERGESTELLTE BIEGSAME ELEMENTE [EN] Plaster/cement compn for flexible sheets - mfr	keine Relevanz -1974	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
34	DE000002040655A	[DE] Spezial-Trennwachs fuer Verschaltungen aus Holz,Kunststoff,Eisen usw.zum Ausschalen von kalt haertendem Material,wie Zement,Beton und aehnlichem Material	Mittlere Relevanz - Patent ist eine Wachs Trennmittel-1970	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
35	DE000002112977B2	[DE] VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR HERSTELLUNG GROSSER PASSGERECHT ANEINANDER ANSCHLIESSENDE FERTIGBAUTEILE AUS BETON	geringe Relevanz - Match cast verfahren 1776	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
36	DE000002112977C3		geringe Relevanz - Match cast verfahren 1776	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
37	DE000002128174A	[DE] VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON WACHSBETON-FORMKOERPERN	keine Relevanz - Waschbeton 1971	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
38	DE000002143450A	[DE] PAPIERBOGEN ZUM EINLEGEN IN FORMEN BEI DER HERSTELLUNG VON WASCHBETON- ODER WASCHPUTZPLATTEN [EN] Aluminium laminated paper - for insertion into washed concrete slab moulds to prevent premature ...	keine Relevanz - Waschbeton 1971	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
39	DE000002153532A	[DE] VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON FORMKOERPERN [EN] Curing porous silicate foams - which may be used in granular form as soil additives, opt contng pesticides etc	keine Relevanz - Wasserglas als binder für formmaterial -1973	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
40	DE000002157371A	[DE] VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON FORMKOERPERN	keine Relevanz - Wasserglas als binder für formmaterial -1973	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
41	DE000002311256A	[DE] VERFAHREN UND EINRICHTUNG ZUM TUNNELBAU	keine Relevanz - Tunnelbau -1973	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
42	DE000002311654A	[DE] DREISCHICHTIGER, AUS KUNSTSTOFFEN BESTEHENDER SPORTHALLENBELAG	keine Relevanz - Kunststoffbelag 1973	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
43	DE000002311654B2		keine Relevanz - Kunststoffbelag 1973	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
44	DE000002419889A	[DE] Verfahren zur Herstellung von Schalungssteinen in Waschbeton, Einrichtung und Verzögerungsmittel zur Ausübung des Verfahrens	keine Relevanz - Waschbeton 1970	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
45	DE000002419889A1	[DE] VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON SCHALUNGSSTEINEN IN WASCHBETON, EINRICHTUNG UND VERZÖGERUNGSMITTEL ZUR AUSÜBUNG DES VERFAHRENS	keine Relevanz -Waschbeton 1970	
46	DE000002444368A1	[DE] WASSERABWEISENDES HAFTMITTEL FÜR GIPSPLATTEN UND VERFAHREN ZUR BESCHICHTUNG VON GIPSPLATTEN MIT EINEM SOLCHEN MITTEL	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
47	DE000002533356A1	[DE] VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON HOLZSPANPLATTEN	geringe Relevanz - imprägnierung von Holzplatten 1975	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
48	DE000002553957A1	[DE] ELEKTROLYSEZELLE MIT SENKRECHTEN ELEKTRODEN	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
49	DE000002633900A1	[DE] VERFAHREN UND SCHALFORM ZUM HERSTELLEN VON BETONFERTIGTEILEN	keine direkte Relevanz aber interessante alternative zu Trennmitteln - Vakuumverfahren - Dokument Prüfen -1976 geringe Relevanz - Polymerbeton und Trennmittel -1979	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
50	DE000002919445A1	[DE] VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON FORMKOERPERN SOWIE TRENNMITTEL ZUR VERWENDUNG BEI DIESEM VERFAHREN	geringe Relevanz - Trennmittel -1979	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
51	DE000002944442A1	[DE] Verfahren für auswechselbare Verankerungen im Beton von Einbauteilen	keine Relevanz - Veankerung -1981	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
52	DE000003031081A1	[DE] Nahtlose Großflächenschalung und Verfahren zu deren Herstellung	Nach Prüfung keine relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
53	DE000003235771A1	[DE] Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Fassadenelementes mit strukturierter Sichtbetonoberfläche [EN] Process and apparatus for producing a façade unit having a textured fair-faced concrete ...	geringe relevanz -1980	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
54	DE000003241798A1	[DE] Herstellung von schall- und wärmedämmenden Bauelementen [EN] Manufacture of acoustically and thermally insulating structural components	keine Relevanz -1982	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
55	DE000003310227A1	[DE] Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Fassadenelementes mit strukturierter Sichtbetonoberfläche [EN] Process and device for manufacturing a façade element with structured facing concrete ...	geringe Relevanz -1984	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
56	DE000003310227C2	[DE] Verfahren und zur Herstellung eines Fassadenelementes aus Beton mit strukturierter Sichtbetonoberfläche	mittlere Relevanz -fast wie Kaupo 1984-Bauunternehmung und Betonwerke Lorenz Kesting	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
57	DE000003316816A1	[DE] Speicher-Grundofen für Raumbeheizung [EN] Basic storage stove for space heating	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
58	DE000003411327A1	[DE] Gegebenenfalls poröse Intumeszenzmassen und ihre Verwendung	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
59	DE000003418318A1	[DE] Bewehrungselement für Spannbeton-Konstruktionsteile	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
60	DE000003429068A1	[DE] Metallverbindungen von Säuregruppen enthaltenden Kondensationsprodukten oder Co-Kondensationsprodukten von Ketonen und Aldehyden	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
61	DE000003534667A1	[DE] Hohlkörper, Behälter, Flasche oder dergleichen sowie Verfahren zu deren Herstellung [EN] Hollow item, container, bottle or the like, and method for its manufacture	keine Relevanz - 1987	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
62	DE000003707029C2	[DE] Verfahren zum Herstellen einer Dekor-Tischplatte	keine Relevanz - wirklich Trivial	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
63	DE000003735806C1	[DE] Verfahren zur automatischen Herstellung von Sonderteilen aus Beton oder Stahlbeton	1 SEHR hoher Relevanz- Dokument Prüfen -198-	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
64	DE000003822162C1	[DE] Betontrennmittel bestehend aus einer Mischung aus einem flüssigen Grundstoff und einem Zusatz [EN] Concrete parting agent comprising a mixture of liquid base material and an additive	geringe Relevanz - Betontrennmittel - 1989	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
65	DE000003830439A1	[DE] Verfahren zum Herstellen eines Leckanzeige- und/oder Wärmedämmspaltes zwischen einer Wand und Verkleidungsplatten sowie hierfür verwendbare Verkleidungsplatten	geringe Relevanz -- 1988	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
66	DE000004006698A1	[DE] Verfahren zum Einformen von Hohlräumen in Beton [EN] Prodn. of cavities in concrete - by reusable core coated with crude montan wax	keine primäre Relevanz -	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
67	DE000004019770A1	[DE] Viskoser Füllstoff für einen Dübel	keine Relevanz -1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>

NR.	Veröffentlichungs-Nummer	Titel	Relevanz für Recherche / Kommentar ITE	Recherchierbarer Text URL
68	DE000004019770C2	[DE] Viskoser Füllstoff für einen Dübel	keine Relevanz - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
69	DE000004038097C1	[DE] Ankerlochschalungskern [EN] Shuttering core for anchor bolt - is unscrewed from concrete after it has set to leave bore for anchor bolt	keine Relevanz - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
70	DE000004140616C2	[DE] Injektionsschlauch	keine Relevanz - 2000	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
71	DE000004215731A1	[DE] Verfahren zum Errichten von Betonwänden mittels Verschalungen sowie Vorrichtung und Mittel zur Durchführung dieses Verfahrens	geringe Relevanz - Wachs als verschlussmittel für Spanstahlhülsen in der Schalung - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
72	DE000004216815A1	[DE] Verfahren zum Schutz von Betonfertigteilen gegen Verbrennung bei Nachbehandlung in einer Erhärtungskammer sowie eine Schalung zur Durchführung des Verfahrens [EN] Protection of concrete parts during ...	keine Relevanz nacherhärten von Betonbauteilen in Kammer Wachs als Beispiel - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
73	DE000004216815C2	[DE] Verfahren zum Schutz von Betonfertigteilen gegen Verbrennung bei Nachbehandlung in einer Erhärtungskammer	keine Relevanz nacherhärten von Betonbauteilen in Kammer Wachs als Beispiel - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
74	DE000004219778C1	[DE] Verfahren und Vorrichtung zum maschinellen Einbau von Spannstäben in Schalungen für Spannbeton-Fertigteile [EN] Prestressing-rod insertion machine in concrete-component shuttering - arranges bars ...	keine Relevanz - Wachs als korrosionsschutz von Stahleinbauteilen - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
75	DE000004234595C1	[DE] In eine Betonschwelle einzubetonierender Schraubdübel [EN] Screw-bush grouted into concrete rail sleeper - has permanently-resilient casing round top part resistant to temperatures occurring during ...	keine Relevanz - Wachs als korrosionsschutz von Stahleinbauteilen - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
76	DE000004234864A1	[DE] Trennbeschichtung für den Konus einer Spannschraube [EN] Protective coating for expansion spindle cone - is in form of stable, thin-walled cap inserted on spindle cone and lost in concrete after ...	keine Relevanz - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
77	DE000004234864C2	[DE] Verfahren zur Herstellung einer Trennbeschichtung für den Konus einer Spannschraube sowie Kappe zur Durchführung des Verfahrens	keine Relevanz - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
78	DE000004318646C1	[DE] Beschichtungsvorrichtung [EN] Coating apparatus	keine Relevanz - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
79	DE000007401868U	[DE] Einlage zum Einlegen in Formen zur Herstellung von Waschbeton- od. Waschputzplatten	keine Relevanz - 1993	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
80	DE000007418356U	[DE] Flexible Einlage zur Verwendung bei Formen für die Herstellung von Waschputz- bzw. Waschbetonplatten	keine Relevanz - 1974	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
81	DE000008019562U1	[DE] VORGEFERTIGTES WANDBAUELEMENT MIT HOHER WÄRME- UND SCHALLDAEMMWIRKUNG	keine Relevanz - 1980	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
82	DE000008227148U1	[DE] Teilesatz zur Herstellung eines Fassadenelementes mit strukturierter Sichtbeton-Oberfläche	keine Relevanz - Elasmär Kopie - 1982	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
83	DE000008328371U1	[DE] Schalkkörper	keine Relevanz - Wachs als Pappierbeschichtung - 1983	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
84	DE000009108134U1	[DE] Spannbolzen für die Herstellung vorgespannter Beton-Fertigteile mit Vorspannung mit sofortigem Verbund	keine Relevanz - 2003	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
85	DE00001002246A1	[DE] Beschichtungsmittel für die Herstellung schwer benetzbarer Oberflächen	keine Relevanz - 2003	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
86	DE000010034425A1	[DE] Verfahren und Vorrichtung zum Aufbringen eines Trennmittels	mittlerer Relevanz - RFL anwendung Prüfen - 2000	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
87	DE000010050788A1	[DE] Zusammensetzung zur Herstellung schwerbenetzbarer Oberflächen [EN] Composition for production of difficult-to-wet surfaces, e.g. self-cleaning surfaces on cars or buildings and tubing with low flow ...	keine Relevanz - 2001	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
88	DE000010136736C1	[DE] Verfahren zur Herstellung eines vorgefertigten Bauelements [EN] Production of pre-fabricated construction elements having a visible side comprises filling gaps between building blocks with dispersible ...	keine Relevanz - 2003	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
89	DE000019542380A1	[DE] Halter [EN] Holder for sheathing bearer supporting slab	keine Relevanz - 1995	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
90	DE000019643950C1	[DE] Wandverbund [EN] Bonding of plastics plates to concrete walls	keine Relevanz - 1995	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
91	DE000019744175C1	[DE] Wärmedämmstoff-Platte als Untergrund für eine Beton-Bekleidung oder Beton-Ummantelung sowie deren Herstellungsverfahren [EN] Heat insulating plate as a foundation for a concrete cladding, especially ...	keine Relevanz - 1997	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
92	DE000019745599A1	[DE] Verbundrohr und Verfahren zu dessen Herstellung [EN] Pipe for use in the floor	mittlere Relevanz - 1997 - Verbundrohre innerer formgebender Kern wird mit Wachs als trennmittel eingestrichen - W schmilzt und bildet drainage-schicht	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
93	DE000019745599C2	[DE] Verbundrohr und Verfahren zu dessen Herstellung	sihe 92	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
94	DE000019801650A1	[DE] Aussparungskörper für Betonteile [EN] Biodegradable concrete cut-out plug member	mittlerer Relevanz - biologisch abbaubare Hohlkörper - 2000	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
95	DE000019857187A1	[DE] Abfallfreie oder abfallarme Herstellung von Formen zur spanlosen Herstellung von flüssigkeitshaltigen auszuformenden Teilen [EN] Mold for making porcelain or ceramic article for home, restaurant, ...	mittlerer Relevanz - Wachs als Formkörper 1998 wiederverwendbare formen	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
96	DE000019902046A1	[DE] Verfahren und Einrichtung zur Schädlingsabwehr [EN] Protection of timber against moisture and fungal attack comprises separation from mineral building elements using non-bituminous system or inclusion ...	keine Relevanz -	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
97	DE000019960512A1	[DE] Verlegevorrichtung und Verfahren zum Erstellen eines Plansteinmauerwerks [EN] Device for applying levelling layer to brickwork consists of a U-profile made from water-impermeable polymer foam.	keine Relevanz - 1999	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
98	DE000019961062A1	[DE] Schalungssystem [EN] Shuttering system for concrete, combining a range of desirable properties, comprises high-strength material formed exclusively by extrusion	geringe Relevanz - Dokument Prüfen - Wachs Holzgemisch als Formkörper 1999 - Patent bezieht sich auf die Form des Profils	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
99	DE000020009269U1	[DE] Schalungselement für eine verlorene Schalung und Verbindungsmittel hierfür	mittlere Relevanz - Holräume DFG Forschung 20.09.1990	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
100	DE000029511225U1	[DE] Schalung	keine Relevanz - 1996	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
101	DE000029908155U1	[DE] Schalung für den Betonbau	geringe relevanz - 1999 -Wegwerfeschalung Papprohr mit XPS Kern	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
102	DE000029911765U1	[DE] Schalung für den Betonbau (Gebrauchsmusterschritte)	geringe relevanz - 1999 -Wegwerfeschalung Papprohr mit XPS Kern	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
103	DE000060018694T2	[DE] Anti-Schrumpfmittel für hydraulische Massen	keine Relevanz - 1998	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
104	DE000060890805T2	[DE] Verfahren zur Verbesserung der Qualität von Mörtel- oder Betonbauteilen und dafür bestimmte Zusätze.	keine Relevanz - 1998	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
105	DE0000609030094T2	[DE] Platzierung von Hülsen für Dübel in Betonbau	keine Relevanz - 1990	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
106	DE0000609532390T2	[DE] VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINES GEGENSTANDES AUS PORÖSEM MATERIAL	keine Relevanz - 1995	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
107	DE0000609602875T2	[DE] Durchlaufbodenplattenkonstruktion	geringe Relevanz - 1996- Faserbodenplatte -> Lukas?	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
108	DE0000609633368T2	[DE] ZEMENTABBINDEVERZÖGERER UND ZEMENTABBINDEVERZÖGERERFOLIE	keine Relevanz - 1996-Chemie	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
109	DE0000609810974T2	[DE] Schalung	keine Relevanz - Bodenschwellen - 1998 siehe auch 102	<a href="https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de/443/DepatisNet/depatisnet?win</a>

NR:	Veröffentlichungs-Nummer	Titel	Relevanz für Recherche / Kommentar ITE	Recherchierbarer Text URL
110	DE000B0027037MAZ		keine Relevanz - behälterbau schalung besteht aus Gips -1998	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
111	DE102004001784A1	[DE] Verfahren zur Bausubstanzerhaltung und -herstellung	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
112	DE102004029026A1	[DE] Bestrahlungseinrichtung	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
113	DE102004059042B3	[DE] Verfahren zum Erstellen einer weißen Wanne [EN] Method to create a white basement in foundation secured by sheet piling whereby wall is erected from inter-connecting plates,space between wall and ...	keine Relevanz WU Wanne mit Spundwand	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
114	DE102006049751A1	[DE] Verfahren zur Herstellung von Formkörpern aus bindemittelhaltigen Gemengen mit extern aktivierter beschleunigter Erstarrung [EN] Production of concrete moldings uses cement mixtures containing hardening ...	keine Relevanz 2006 - aber die Mikrowellemkanone hätte ich auch gerne	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
115	DE102007017471A1	[DE] Verfahren zur Herstellung einer Negativform für die Fertigung von ein Gerinne aufweisenden Schachtbodenstücken	Hohe Relevanz - Dokument Prüfen - Wachs als Formkörper 2008	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
116	DE102009035267A1	[DE] Wasserbasiertes Beschichtungsmittel	keine Relevanz 2009	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
117	DE102009054563A1	[DE] Herstellung von mineralisch gebundenen Beschichtungen mit duktilen Eigenschaften	keine Relevanz 2009	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
118	DE102010029046A1	[DE] Montageschiene	keine Relevanz 2010	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
119	DE102010030241A1	[DE] Verfahren zur Herstellung einer Negativform zur Herstellung von Betonelementen	mittlere Relevanz - Dokument Prüfen - Formkörper aus EPS und Wachs als Tren-Beschichtung 2010	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
120	DE102011050725A1	[DE] Stapelbares Flächenmodul für eine Wandfläche	mittlere relevanz -flächenmodul evn als Dchalung 2011	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
121	DE102011050725B4	[DE] Stapelbares Flächenmodul für eine Wandfläche	siehe #120	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
122	DE102012100334A1	[DE] Herstellung architektonischer Strukturen aus Aggregaten konkaver Gebilde [EN] Method for manufacturing architectural structures of aggregated concave image, involves aggregating concave image by ...	keine Relevanz - 2012 von Menges	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
123	DE102012101939A1	[DE] Verfahren und Vorrichtung zum schichtweisen Aufbau eines Formkörpers	geringe Relevanz - Dokument Prüfen - wachs nur als trennmittel 2012	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
124	DE102012108132A1	[DE] Verfahren zur Herstellung von Bewehrungselementen aus faserverstärktem Kunststoff sowie nach diesem Verfahren hergestellte Bewehrungselemente	keine Relevanz 2012	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
125	DE102012217324A1	[DE] System und Verfahren zum Herstellen von rohrförmigen Betonprodukten	geringe Relevanz 2012 - wachs als trennmittel	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
126	DE202008012108U1	[DE] Formkörper für lichtleitende Betonelemente mit definierter Einzelfaseranordnung	hohe Relevanz - Dokument Prüfen - 2008 (Gebrauchsmuster)	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
127	DE202010001525U1	[DE] Schalung mit einem Sickerschalkörper zur Betonschwellenherstellung	geringe Relevanz- 2010 - Wachs als Trennmittel	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
128	DE202012010890U1	[DE] Hinterschneidungswerkzeug zur Erzeugung eines Sacklochs	keine Relevanz 2012	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
129	DD000000101851A		keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
130	DD000000103219A5		keine Relevanz 1972 BASF	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
131	DD000000108788A1	[DE] Wasserdichte Fuge für montierte Dachtragplatten	geringe Relevanz- 1974 - Wachs als Trennmittel	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
132	DD000000124477A5	[DE] Verfahren und Einrichtung zur Herstellung einer die Haftung zwischen Rohbeton und Metall- oder Holzflächen verhindernden Emulsion	geringe Relevanz- 1974 - Wachs als Trennmittel	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
133	DD000000130065A1	[DE] GLEITSCHALUNG ZUR HERSTELLUNG VON BAUWERKEN MIT VERAENDERLICHEM QUERSCHNITT	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
134	DD000000146468A1	[DE] FORMTRENNMITTEL FUER BETON UND BETONFERTIGTEILE	keine Relevanz 1979	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
135	DD000000148888A3	[DE] VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG OBERFLAECHEVERGUETETER LEICHTENTSCHALBARER BAUELEMENTE	keine Relevanz- 1978 - Wachs als Trennmittel	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
136	DD000000154946A3	[DE] NAHTLOSE GROSSFLAECHENSCHALUNG	keine Relevanz- 1979 - Wachs als Trennmittel	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
137	DD000000218520A1	[DE] VERFAHREN ZUM HERSTELLEN VON STRAHLUNGSFLAECHEN	keine Relevanz- 1979 - Wachs als Trennmittel	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
138	DD000000239598A5	[DE] VERWENDUNG VON METALLVERBINDUNGEN VON KONDENSATIONSPRODUKTEN	keine Relevanz	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
139	DD000000271725A1	[DE] VERFAHREN ZUR SICHERUNG DES VERBUNDES ZWISCHEN ORTBETONSCHLITZWAENDEN, -PFEILERN UND VORSATZSCHALEN	keine Relevanz 1988- Wachs als Trennmittel	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
140	DD000000276862A1	[DE] VERFAHREN ZUR NACHBEHANDLUNG VON BETON	keine Relevanz 1988- Wachs zur nachbehandlung von beton	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>
141	DD000000299130A7	[DE] VERFAHREN UND VORRICHTUNGEN ZUM EINBRINGEN VON DEHNUNGSFUGEN IN MONOLITISCHE SCHORNSTEINFUTTER	keine Relevanz 1990	<a href="https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win">https://depatisnet.dpma.de:443/DepatisNet/depatisnet?win</a>

Nr.: 1 - Abkürzung: HR64-66

## H&R Wax Company GmbH



### Produktdatenblatt

1/1

Verkaufsbezeichnung  
Kundenproduktbezeichnung  
Ausgabe / Version

**H&R WAX 64/66**  
  
1 / 13.02.2014

Prüfung	Methode	Einheit	Typisch
Farbzahl Saybolt	ASTM D 6045	-	30
EP am rot. Thermometer	DIN ISO 2207	°C	65
Kin. Viskosität 100 °C	DIN EN ISO 3104	mm <sup>2</sup> /s	6.2
Ölgehalt	DIN 51531	Gew.-%	0.5
Nadelpenetration 25 °C	DIN 51579	mm/10	19
Reinheit	FDA 172.886	-	entspricht

Die angegebenen Daten dienen zur Übersicht. Eine Verbindlichkeit lässt sich daraus nicht ableiten. Abweichungen zu obigen Angaben sind keine Grundlage für Reklamationen.



Headquarters:  
H&R Group  
Am Sandtorkai 64  
20457 Hamburg, Germany  
Phone +49 40 43218-0  
Fax +49 40 43218-400  
Internet [www.hur.com](http://www.hur.com)

Mineral oil and vaseline plant:  
Tudapetrol KG  
Halskestraße 30-34  
22113 Hamburg, Germany  
Phone +49 40 781108-0  
Fax +49 40 781108-199

Refinery Salzbergen:  
H&R ChemPharm GmbH  
Neuenkirchener Straße 8  
48499 Salzbergen, Germany  
Phone +49 5976 945-0  
Fax +49 5976 945-624

Refinery Hamburg:  
H&R Ölwerke Schindler GmbH  
Neuhöfer Brückenstr. 127-152  
21107 Hamburg, Germany  
Phone +49 40 32523-0  
Fax +49 40 32523-285

Nr.: 2 - Abkürzung: HR60-62

## H&R Wax Company GmbH



### Produktdatenblatt

1/1

Verkaufsbezeichnung  
Kundenproduktbezeichnung  
Ausgabe / Version

**H&R WAX 60/62 321**  
1 / 13.02.2014

Prüfung	Methode	Einheit	Typisch
Farbzahl Saybolt	ASTM D 6045	-	30
EP am rot. Thermometer	DIN ISO 2207	°C	61
Kin. Viskosität 100 °C	DIN EN ISO 3104	mm <sup>2</sup> /s	4.7
Ölgehalt	DIN 51531	Gew.-%	0.5
Nadelpenetration 25 °C	DIN 51579	mm/10	15
Reinheit	BfR Empfehlung XXV BII		entspricht
Reinheit	Ph. Eur. gültige Ausgabe		entspricht

Die angegebenen Daten dienen zur Übersicht. Eine Verbindlichkeit lässt sich daraus nicht ableiten. Abweichungen zu obigen Angaben sind keine Grundlage für Reklamationen.



Headquarters:  
H&R Group  
Am Sandtorkai 64  
20457 Hamburg, Germany  
Phone +49 40 43218-0  
Fax +49 40 43218-400  
Internet www.hur.com

Mineral oil and vaseline plant:  
Tudapetrol KG  
Halskestraße 30-34  
22113 Hamburg, Germany  
Phone +49 40 781108-0  
Fax +49 40 781108-199

Refinery Salzbergen:  
H&R ChemPharm GmbH  
Neuenkirchener Straße 8  
48499 Salzbergen, Germany  
Phone +49 5976 945-0  
Fax +49 5976 945-624

Refinery Hamburg:  
H&R Ölwerke Schindler GmbH  
Neuhöfer Brückenstr. 127-152  
21107 Hamburg, Germany  
Phone +49 40 32523-0  
Fax +49 40 32523-285



Nr.: 3 - Abkürzung: HR-Wic

## H&R Wax Company GmbH



### Produktdatenblatt

1/1

Verkaufsbezeichnung **H&R WICROFIN 74**  
Kundenproduktbezeichnung  
Ausgabe / Version 1 / 13.02.2014

Prüfung	Methode	Einheit	Typisch
Farbzahl Saybolt	ASTM D 6045	-	22
EP am rot. Thermometer	DIN ISO 2207	°C	72
Kin. Viskosität 100 °C	DIN EN ISO 3104	mm <sup>2</sup> /s	11.2
Ölgehalt	DIN 51531	Gew.-%	0.8
Nadelpenetration 25 °C	DIN 51579	mm/10	20
Reinheit	FDA 172.886	-	entspricht

Die angegebenen Daten dienen zur Übersicht. Eine Verbindlichkeit lässt sich daraus nicht ableiten. Abweichungen zu obigen Angaben sind keine Grundlage für Reklamationen.



Headquarters:  
H&R Group  
Am Sandtorkai 64  
20457 Hamburg, Germany  
Phone +49 40 43218-0  
Fax +49 40 43218-400  
Internet www.hur.com

Mineral oil and vaseline plant:  
Tudapetrol KG  
Halskestraße 30-34  
22113 Hamburg, Germany  
Phone +49 40 781108-0  
Fax +49 40 781108-199

Refinery Salzbergen:  
H&R ChemPharm GmbH  
Neuenkirchener Straße 8  
48499 Salzbergen, Germany  
Phone +49 5976 945-0  
Fax +49 5976 945-624

Refinery Hamburg:  
H&R Ölwerke Schindler GmbH  
Neuhöfer Brückenstr. 127-152  
21107 Hamburg, Germany  
Phone +49 40 32523-0  
Fax +49 40 32523-285

Nr.: 4 - Abkürzung: KW 2811

## Analysenzertifikat



### Kahl & Co

Otto-Hahn-Strasse 2  
**22946 Trittau**  
Deutschland

Zertifikatsnummer: 25564/44463  
Kunde: 100000/

erstellt am: 05.11.2014  
Seite / Seiten: 1 / 1

**Artikel** Kahlwax 2811

**Batch** F1442023-002

Produktion: 17.10.2014  
Wiederholungsprüfung: 17.10.2017

Parameter	Test	Spezifikation	Methode
Tropfpunkt	79 °C	79 - 85 °C	Mettler ( mod.)
Säurezahl	14 mg KOH/ g	0 - 15 mg KOH/ g	EU Pharm.
Verseifungszahl	89 mg KOH/ g	65 - 95 mg KOH/ g	EU Pharm.

### KAHL GMBH & CO. KG

Dieses Analysenzertifikat ist maschinell erstellt und daher ohne Unterschrift gültig.

Lagerung in geschlossenen Gebinden, vor Licht geschützt und bei Temperaturen nicht über 40 °C

Die vorstehenden Angaben sind das Ergebnis unserer Qualitätskontrolle. Sie entbinden den Käufer nicht von einer Eingangskontrolle und haben nicht die Bedeutung, die Eignung des Produktes für einen konkreten Einsatzzweck zuzusichern.



Kahl GmbH & Co. KG . Otto-Hahn-Str. 2 . 22946 Trittau / Germany . Phone +49 (04154) 84310 . Fax no + 49 (04154) 843110 – eMail: info@kahlwax.de – www.kahlwax.de

Nr.: 5 - Abkürzung: KW 4180

## Analysenzertifikat



### Kahl & Co

Otto-Hahn-Strasse 2  
22946 Trittau  
Deutschland

Zertifikatsnummer: 25565/32608  
Kunde: 100000/

erstellt am: 05.11.2014  
Seite / Seiten: 1 / 1

**Artikel** Kahlwax 4180

**Batch** 14-F0275

Produktion: 02.05.2014  
Wiederholungsprüfung: 02.05.2017

Parameter	Test	Spezifikation	Methode
Tropfpunkt	112 °C	108 - 116 °C	Mettler ( mod.)

### KAHL GMBH & CO. KG

Dieses Analysenzertifikat ist maschinell erstellt und daher ohne Unterschrift gültig.

Lagerung in geschlossenen Gebinden, vor Licht geschützt und bei Temperaturen nicht über 25 °C

Die vorstehenden Angaben sind das Ergebnis unserer Qualitätskontrolle. Sie entbinden den Käufer nicht von einer Eingangskontrolle und haben nicht die Bedeutung, die Eignung des Produktes für einen konkreten Einsatzzweck zuzusichern.



Kahl GmbH & Co. KG . Otto-Hahn-Str. 2 . 22946 Trittau / Germany . Phone +49 (0)4154) 84310 . Fax no + 49 (0)4154) 843110 – eMail: info@kahlwax.de – www.kahlwax.de

Nr.: 6 - Abkürzung: KW 5023

## Analysenzertifikat



**Kahl & Co**

Otto-Hahn-Strasse 2

**22946 Trittau**

Deutschland

Zertifikatsnummer: 25566/6076

Kunde: 100000/

erstellt am: 05.11.2014

Seite / Seiten: 1 / 1

**Artikel** Kahlwax 5023

**Batch** R1208001

Produktion: 19.01.2012

Wiederholungsprüfung: 19.01.2015

Parameter	Test	Spezifikation	Methode
Erstarrungspunkt	79 °C	76 - 82 °C	DGF M-III 4a
Tropfpunkt	83 °C	80 - 86 °C	Mettler ( mod.)
Säurezahl	14 mg KOH/ g	5 - 15 mg KOH/ g	EU Pharm.
Verseifungszahl	91 mg KOH/ g	80 - 95 mg KOH/ g	EU Pharm.
Aschegehalt	0,250 %	max. 0,400 %	EU Pharm.

**KAHL GMBH & CO. KG**

Dieses Analysenzertifikat ist maschinell erstellt und daher ohne Unterschrift gültig.

Lagerung in geschlossenen Gebinden, vor Licht geschützt und bei Temperaturen nicht über 40 °C

Die vorstehenden Angaben sind das Ergebnis unserer Qualitätskontrolle. Sie entbinden den Käufer nicht von einer Eingangskontrolle und haben nicht die Bedeutung, die Eignung des Produktes für einen konkreten Einsatzzweck zuzusichern.



Kahl GmbH & Co. KG . Otto-Hahn-Str. 2 . 22946 Trittau / Germany . Phone +49 (04154) 84310 . Fax no + 49 (04154) 843110 - eMail: info@kahlwax.de - www.kahlwax.de

Nr.: 7 - Abkürzung: KW 6607L

## Analysenzertifikat



**Kahl & Co**

Otto-Hahn-Strasse 2  
**22946 Trittau**  
Deutschland

Zertifikatsnummer: 25567/28052  
Kunde: 100000/

erstellt am: 05.11.2014  
Seite / Seiten: 1 / 1

**Artikel** Kahlwax 6607L

**Batch** F1406023-001

Produktion: 06.02.2014  
Wiederholungsprüfung: 03.02.2017

Parameter	Test	Spezifikation	Methode
Tropfpunkt	75 °C	74 - 80 °C	Mettler ( mod.)
Säurezahl	4 mg KOH/ g	2 - 8 mg KOH/ g	EU Pharm.
Verseifungszahl	94 mg KOH/ g	75 - 95 mg KOH/ g	EU Pharm.
Peroxidzahl	0 meq/ kg	0 meq/ kg	DGF M-IV 9

**KAHL GMBH & CO. KG**

Dieses Analysenzertifikat ist maschinell erstellt und daher ohne Unterschrift gültig.

Lagerung in geschlossenen Gebinden, vor Licht geschützt und bei Temperaturen nicht über 30 °C


Die vorstehenden Angaben sind das Ergebnis unserer Qualitätskontrolle. Sie entbinden den Käufer nicht von einer Eingangskontrolle und haben nicht die Bedeutung, die Eignung des Produktes für einen konkreten Einsatzzweck zuzusichern.



Kahl GmbH & Co. KG · Otto-Hahn-Str. 2 · 22946 Trittau / Germany · Phone +49 (04154) 84310 · Fax no + 49 (04154) 843110 – eMail: info@kahlwax.de – www.kahlwax.de



Nr.: 8 - Abkürzung: CFW

<p>PRODUKTINFORMATION Stand 6: 07/2011 S 1/1</p>		<p>WACHS- U. CERESIN-FABRIKEN <b>TH.C.TROMM</b> G.M.B.H. KÖLN</p>																														
<p>BESCHREIBUNG</p>		<p><u>ConFormWax®</u></p> <p>Wachscompound für den Feinguss von Metallen</p>																														
<p>EIGENSCHAFTEN</p>		<table><tr><td>Erstarrungspunkt</td><td>(ISO 2207)</td><td>62 - 66</td><td>°C</td></tr><tr><td>Tropfpunkt *)</td><td>(ISO 2176)</td><td>73 - 79</td><td>°C</td></tr><tr><td>Penetration bei 25°C</td><td>(DIN 51 579)</td><td>3 - 5</td><td>0,1mm</td></tr><tr><td>Viskosität bei 90°C</td><td>(DIN 53 019)</td><td>20 - 30</td><td>mPas</td></tr><tr><td>Viskosität bei 100°C *)</td><td>(DIN 53 019)</td><td>80 - 110</td><td>mPas</td></tr><tr><td>Dichte bei 20°C</td><td></td><td>ca. 0,95</td><td>g/ml</td></tr><tr><td>Farbe *)</td><td>(visuell)</td><td colspan="2">weißlich/elfenbein-hell</td></tr></table>			Erstarrungspunkt	(ISO 2207)	62 - 66	°C	Tropfpunkt *)	(ISO 2176)	73 - 79	°C	Penetration bei 25°C	(DIN 51 579)	3 - 5	0,1mm	Viskosität bei 90°C	(DIN 53 019)	20 - 30	mPas	Viskosität bei 100°C *)	(DIN 53 019)	80 - 110	mPas	Dichte bei 20°C		ca. 0,95	g/ml	Farbe *)	(visuell)	weißlich/elfenbein-hell	
Erstarrungspunkt	(ISO 2207)	62 - 66	°C																													
Tropfpunkt *)	(ISO 2176)	73 - 79	°C																													
Penetration bei 25°C	(DIN 51 579)	3 - 5	0,1mm																													
Viskosität bei 90°C	(DIN 53 019)	20 - 30	mPas																													
Viskosität bei 100°C *)	(DIN 53 019)	80 - 110	mPas																													
Dichte bei 20°C		ca. 0,95	g/ml																													
Farbe *)	(visuell)	weißlich/elfenbein-hell																														
		<p>*) Bestandteil der Lieferspezifikation</p>																														
<p>ANWENDUNG</p>		<p>Verformen unter Druck (10-20 bar) bei einer Temperatur von 50-90 °C</p>																														
<p>LIEFERFORM</p>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Pastillen, verpackt in 25 kg Gebinde</li></ul>																														
<p>TH. C. TROMM GMBH Feuerstr.7-17 D-50735 Köln Tel.: +49 221 974552-0 e-mail: info@wax-tromm.de</p>		<p>Hinweise und Empfehlungen für die Verwendung unserer Produkte geben wir nach unseren Kenntnissen. Bitte haben Sie Verständnis, wenn wir eine Verbindlichkeit für das zu erzielende Ergebnis sowie die Beachtung möglicher Rechte Dritter nicht übernehmen können.</p>																														

Nr.: 9- Abkürzung: PW

PRODUKTINFORMATION  
Stand 4: 01/2010 S 1/1

WACHS- U. CERESIN-FABRIKEN  
**TH.C.TROMM**  
G.M.B.H. KÖLN



## **POLARWACHS® 30 839**

### CHARAKTERISIERUNG

hartes, neutrales Polyethylenwachs

### EIGENSCHAFTEN

Tropfpunkt *)	(ISO 2176)	110 - 121	°C
Penetration bei 25°C	(DIN 51 579)	ca. 1	0,1 mm
Viskosität bei 140°C *)	(DIN 53 019)	500 - 620	mPas
Viskosität bei 150°C	(DIN 53 019)	400 - 510	mPas
Säurezahl		keine	
Dichte		ca. 0,94	g/ml
Konsistenz	(visuell)	hart-trocken	
Farbe *)	(visuell)	weiß/weißlich	

\*) Bestandteil der Lieferspezifikation

### ERFÜLLTE REINHEITS-ANFORDERUNGEN

Empfehlung III der deutschen BfR  
Directive 2002/72/EG  
U.S. FDA title 21 § 175.300, 175.105, 177.1520

### VERWENDUNG

- Additiv zur Verbesserung der Temperaturbeständigkeit und Retention in kosmetischen und pharmazeutischen Präparationen
- Modifizierung von Wachsen, Fetten, Ölen, Harzen
- Komponente bei der Herstellung von Druckfarben, Farbstiften, Bleistiftminen und Heißkarbonfarben
- Basis für die Herstellung von Lösemittel-Dispersionen
- Komponente in Heißschmelz-Klebstoffen

### LIEFERFORM

- Granulat/Feinkorn, verpackt in 25 kg Gebinde

TH. C. TROMM GMBH  
Feuerstr.7-17 D-50735 Köln  
Tel.: +49 221 974552-0  
e-mail: info@wax-tromm.de

Hinweise und Empfehlungen für die Verwendung unserer Produkte geben wir nach unseren Kenntnissen. Bitte haben Sie Verständnis, wenn wir eine Verbindlichkeit für das zu erzielende Ergebnis sowie die Beachtung möglicher Rechte Dritter nicht übernehmen können.

Nr.: 10 - Abkürzung: PC

PRODUKTINFORMATION  
Stand 4: 01/2012 S 1/1

WACHS- U. CERESIN-FABRIKEN  
**TH.C.TROMM**  
G.M.B.H. KÖLN



## POLYCERIT® N 174

### CHARAKTERISIERUNG

Polyethylenwachs

### EIGENSCHAFTEN

Tropfpunkt *)	(ISO 2176)	117 – 122	°C
Säurezahl		keine	
Verseifungszahl		keine	
Viskosität bei 140°C	(DIN 53 019)	350 – 750	mPas
Farbe *)	(visuell)	weiß / weißlich	
Dichte bei 20 °C		ca. 0,93	g/ml

\*) Bestandteil der Lieferspezifikation



### LIEFERFORM

- Pastillen
- Feinkorn

TH. C. TROMM GMBH  
Feuerstr.7-17 D-50735 Köln  
Tel.: +49 221 974552-0  
e-mail: info@wax-tromm.de

Hinweise und Empfehlungen für die Verwendung unserer Produkte geben wir nach unseren Kenntnissen. Bitte haben Sie Verständnis, wenn wir eine Verbindlichkeit für das zu erzielende Ergebnis sowie die Beachtung möglicher Rechte Dritter nicht übernehmen können.

Nr.: 11 - Abkürzung: PW 3119

<b>ROMONTA</b> 																	
Romonta GmbH OT Amsdorf Chausseestraße 1 06317 Seegebiet Mansfelder Land Tel. Qualitätssicherung: 03 46 01/40-2 83																	
<b>Qualitätsprüf-Zertifikat</b>																	
DIN 55 350 - 18 - 4.2.2 (Prüfung an der Liefereinheitsprobe)																	
Empfänger:	Technische Universität Braunschweig ITE – Institut für Tragwerksentwurf Pockelstraße 4 38106 Braunschweig																
Produkt:	PW 3119																
Liefereinheitsnummer:	Musterlieferung																
Liefermenge:	10 kg																
Lieferdatum:	02.02.2015																
Ordernummer:	-																
Kenndaten:																	
<table border="1"><thead><tr><th>Kennzahl*</th><th>Einheit</th><th>Prüfergebnisse</th></tr></thead><tbody><tr><td>Tropfpunkt</td><td>°C</td><td>97,0</td></tr><tr><td>Glührückstand</td><td>%</td><td>0,02</td></tr><tr><td>Nadelpenetration (25°C)</td><td>10<sup>-1</sup> mm</td><td>4,1</td></tr><tr><td>Viskosität (100°C)</td><td>mPas</td><td>37</td></tr></tbody></table>			Kennzahl*	Einheit	Prüfergebnisse	Tropfpunkt	°C	97,0	Glührückstand	%	0,02	Nadelpenetration (25°C)	10 <sup>-1</sup> mm	4,1	Viskosität (100°C)	mPas	37
Kennzahl*	Einheit	Prüfergebnisse															
Tropfpunkt	°C	97,0															
Glührückstand	%	0,02															
Nadelpenetration (25°C)	10 <sup>-1</sup> mm	4,1															
Viskosität (100°C)	mPas	37															
* Die angegebenen Kennzahlen werden nach den ROMONTA-Analysenvorschriften ermittelt.																	
Die vorstehenden Angaben geben die Ergebnisse unserer Qualitätsprüfungen wieder. Sie bedeuten keine rechtliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften des Produktes oder seiner Eignung für einen konkreten Einsatzzweck. Wir gewährleisten die vertragsmäßige Beschaffenheit unseres Produktes im Rahmen unserer „Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen“. Alle Werte gelten bei Verlassen des Lieferwerkes.																	
 Qualitätssicherung		Amsdorf, 02.02.2015															

Nr.: 12 - Abkürzung: PW 3139

**ROMONTA**



Romonta GmbH  
OT Amsdorf  
Chausseestraße 1  
06317 Seegebiet Mansfelder Land  
Tel. Qualitätssicherung: 03 46 31/40-2 83

### Qualitätsprüf-Zertifikat

DIN 55 350 - 18 - 4.2.2  
(Prüfung an der Liefereinheitsprobe)

Empfänger: Technische Universität Braunschweig  
ITE – Institut für Tragwerksentwurf  
Pockelstraße 4  
38106 Braunschweig

Produkt: PW 3139  
Liefereinheitsnummer: Musterlieferung  
Liefermenge: 10 kg  
Lieferdatum: 20.02.2015  
Ordernummer: -

Kenndaten:

Kennzahl*	Einheit	Prüfergebnisse
Tropfpunkt	°C	110,4
Glührückstand	%	0,02
Nadelpenetration (25°C)	10 <sup>-1</sup> mm	3,6
Viskosität (100°C)	mPas	333

\* Die angegebenen Kennzahlen werden nach den ROMONTA-Analysenvorschriften ermittelt.


Die vorstehenden Angaben geben die Ergebnisse unserer Qualitätsprüfungen wieder. Sie bedeuten keine rechtliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften des Produktes oder seiner Eignung für einen konkreten Einsatzzweck. Wir gewährleisten die vertragsmäßige Beschaffenheit unseres Produktes im Rahmen unserer „Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen“. Alle Werte gelten bei Verlassen des Lieferwerkes.

  
Qualitätssicherung


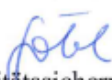
Amsdorf, 18.02.2015



Nr.: 13 - Abkürzung: PW 3146

<b>ROMONTA</b> 																	
Romonta GmbH OT Amsdorf Chausseestraße 1 06317 Seegebiet Mansfelder Land Tel. Qualitätssicherung: 03 46 01/40-2 83																	
<b>Qualitätsprüf-Zertifikat</b>																	
DIN 55 350 - 18 - 4.2.2 (Prüfung an der Liefereinheitsprobe)																	
Empfänger:	Technische Universität Braunschweig ITE – Institut für Tragwerksentwurf Pöckelstraße 4 38106 Braunschweig																
Produkt:	PW 3146																
Liefereinheitsnummer:	Musterlieferung																
Liefermenge:	10 kg																
Lieferdatum:	02.02.2015																
Ordernummer:	-																
Kenndaten:																	
<table border="1"><thead><tr><th>Kennzahl*</th><th>Einheit</th><th>Prüfergebnisse</th></tr></thead><tbody><tr><td>Tropfpunkt</td><td>°C</td><td>98,1</td></tr><tr><td>Glührückstand</td><td>%</td><td>0,02</td></tr><tr><td>Nadelpenetration (25°C)</td><td>10<sup>-1</sup> mm</td><td>2,5</td></tr><tr><td>Viskosität (100°C)</td><td>mPas</td><td>1200</td></tr></tbody></table>			Kennzahl*	Einheit	Prüfergebnisse	Tropfpunkt	°C	98,1	Glührückstand	%	0,02	Nadelpenetration (25°C)	10 <sup>-1</sup> mm	2,5	Viskosität (100°C)	mPas	1200
Kennzahl*	Einheit	Prüfergebnisse															
Tropfpunkt	°C	98,1															
Glührückstand	%	0,02															
Nadelpenetration (25°C)	10 <sup>-1</sup> mm	2,5															
Viskosität (100°C)	mPas	1200															
* Die angegebenen Kennzahlen werden nach den ROMONTA-Analysenvorschriften ermittelt.																	
Die vorstehenden Angaben geben die Ergebnisse unserer Qualitätsprüfungen wieder. Sie bedeuten keine rechtliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften des Produktes oder seiner Eignung für einen konkreten Einsatzzweck. Wir gewährleisten die vertragsmäßige Beschaffenheit unseres Produktes im Rahmen unserer „Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen“. Alle Werte gelten bei Verlassen des Lieferwerkes.																	
Qualitätssicherung 		Amsdorf, 02.02.2015															

Nr.: 14 - Abkürzung: RC253

<b>ROMONTA</b> 																					
Romonta GmbH OT Amsdorf Chausseestraße 1 06317 Seegebiet Mansfelder Land Tel. Qualitätssicherung: 03 46 01/40-2 83																					
<b>Qualitätsprüf-Zertifikat</b>																					
DIN 55 350 - 18 - 4.2.2 (Prüfung an der Liefereinheitsprobe)																					
Empfänger:	Technische Universität Braunschweig ITE – Institut für Tragwerksentwurf Pockelstraße 4 38106 Braunschweig																				
Produkt:	Romocast 253																				
Liefereinheitsnummer:	Musterlieferung																				
Liefermenge:	10 kg																				
Lieferdatum:	02.02.2015																				
Ordernummer:	-																				
Produktspezifikation:																					
<table border="1"><thead><tr><th>Kennzahl*</th><th>Einheit</th><th>Spezifikationsgrenzen</th><th>Prüfergebnisse</th></tr></thead><tbody><tr><td>Tropfpunkt</td><td>°C</td><td>75 – 79</td><td>76,3</td></tr><tr><td>Glührückstand</td><td>%</td><td>max. 0,05</td><td>0,02</td></tr><tr><td>Nadelpenetration (25 °C)</td><td>10<sup>-1</sup>mm</td><td>2 – 5</td><td>2,5</td></tr><tr><td>Viskosität (100 °C)</td><td>mPas</td><td>150 - 500</td><td>228</td></tr></tbody></table>		Kennzahl*	Einheit	Spezifikationsgrenzen	Prüfergebnisse	Tropfpunkt	°C	75 – 79	76,3	Glührückstand	%	max. 0,05	0,02	Nadelpenetration (25 °C)	10 <sup>-1</sup> mm	2 – 5	2,5	Viskosität (100 °C)	mPas	150 - 500	228
Kennzahl*	Einheit	Spezifikationsgrenzen	Prüfergebnisse																		
Tropfpunkt	°C	75 – 79	76,3																		
Glührückstand	%	max. 0,05	0,02																		
Nadelpenetration (25 °C)	10 <sup>-1</sup> mm	2 – 5	2,5																		
Viskosität (100 °C)	mPas	150 - 500	228																		
* Die angegebenen Kennzahlen werden nach den ROMONTA-Analysenvorschriften ermittelt.																					
Die vorstehenden Angaben geben die Ergebnisse unserer Qualitätsprüfungen wieder. Sie bedeuten keine rechtliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften des Produktes oder seiner Eignung für einen konkreten Einsatzzweck. Wir gewährleisten die vertragsmäßige Beschaffenheit unseres Produktes im Rahmen unserer „Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen“. Alle Werte gelten bei Verlassen des Lieferwerkes.																					
 Qualitätssicherung	Amsdorf, 02.02.2015																				

Nr.: 15 - Abkürzung: RC252

**ROMONTA**



Romonta GmbH  
OT Amsdorf  
Chausseestraße 1  
06317 Seegebiet Mansfelder Land  
Tel. Qualitätssicherung: 03 46 01/40-2 83

### Qualitätsprüf-Zertifikat

DIN 55 350 - 18 - 4.2.2  
(Prüfung an der Liefereinheitsprobe)

Empfänger: Technische Universität Braunschweig  
ITE – Institut für Tragwerksentwurf  
Pockelstraße 4  
38106 Braunschweig

Produkt: Romocast 252  
Liefereinheitsnummer: Musterlieferung  
Liefermenge: 10 kg  
Lieferdatum: 02.02.2015  
Ordernummer: -

Produktspezifikation:

Kennzahl*	Einheit	Spezifikationsgrenzen	Prüfergebnisse
Tropfpunkt	°C	78 – 82	80,1
Glührückstand	%	max. 0,05	0,02
Nadelpenetration (25 °C)	10 <sup>-1</sup> mm	2 – 5	2,0
Viskosität (100 °C)	mPas	300 - 3000	377

\* Die angegebenen Kennzahlen werden nach den ROMONTA-Analysenvorschriften ermittelt.

Die vorstehenden Angaben geben die Ergebnisse unserer Qualitätsprüfungen wieder. Sie bedeuten keine rechtliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften des Produktes oder seiner Eignung für einen konkreten Einsatzzweck. Wir gewährleisten die vertragsmäßige Beschaffenheit unseres Produktes im Rahmen unserer „Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen“. Alle Werte gelten bei Verlassen des Lieferwerkes.

  
Qualitätssicherung

Amsdorf, 02.02.2015

Nr.: 16 - Abkürzung: SSW1

## PRODUKTDATENBLATT

### SASOLWAX 6403

Druckdatum: 18.04.2013

Letzte Änderung: 08.11.2012

Eigenschaft	Methode	Einheit	Spezifikation		
Erstarrungspunkt	DIN ISO 2207	°C	63,0	-	66,0
Ölgehalt	DIN-ISO 2908	%	0,00	-	0,50
Nadelpenetration 25°C	DIN 51579	1/10mm	16	-	20
Farbe Saybolt	ASTM D 156	-	29,0	-	30,0

*Diese Veröffentlichung und die darin enthaltenen Informationen wurden sorgfältig zusammengestellt und überprüft und sind als zum Zeitpunkt der Drucklegung zutreffend anzusehen. Für ihre Aktualität, Vollständigkeit, Qualität sowie Richtigkeit können wir dennoch keinerlei Gewähr oder Zusicherung übernehmen. Diese Veröffentlichung dient lediglich der Information und stellt keine Zusicherung von Eigenschaften dar. Dem Benutzer obliegt es, die Produkte zu untersuchen und mit der gebotenen Vorsicht zu benutzen sowie alle geltenden Gesetze und Verordnungen zu beachten. Sasol Wax GmbH übernimmt keinerlei Verantwortung oder Haftung insbesondere für den Fall, dass unsere Produkte falsch, ohne die notwendigen Vorsichtsmaßnahmen, entgegen Empfehlungen oder zweckentfremdet angewendet bzw. eingesetzt werden sowie für mit der Natur der Stoffe verbundene Gefahren. Es wird empfohlen, sich beim Hersteller zu informieren, insbesondere wenn das Produkt für andere als die in dieser Produktinformation beschriebenen Anwendungen genutzt werden soll. Im Übrigen gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen in der jeweils aktuellen Fassung.*

#### Sasol Wax GmbH

Worthdamm 13-27, 20457 Hamburg, Postanschrift: Postfach 11 02 49, 20402 Hamburg  
Telefon: +49 40 78115-0 Telefax: +49 40 78115-777 wax@de.sasol.com www.sasolwax.com

Geschäftsführung: Hendrik Edwin Vorsteveld

Registergericht Hamburg: HRB 73963 USt-IdNr./VAT No.: DE 118 922 039 Steuer-Nr./Tax-No. 27/164/00096

Nr.: 17 - Abkürzung: SSW2

## PRODUKTDATENBLATT

### SASOLWAX 3279

Druckdatum: 18.04.2013

Letzte Änderung: 08.11.2012

Eigenschaft	Methode	Einheit	Spezifikation		
Erstarrungspunkt	DIN ISO 2207	°C	76,0	-	82,0
Tropfpunkt	Metler 1°C/min	°C	80,0	-	86,0
Ölgehalt	DIN-ISO 2908	%	0,00	-	2,00
Nadelpenetration 25°C	DIN 51579	1/10mm	14	-	18
Farbe Saybolt	ASTM D 156	-	18,0	-	30,0

*Diese Veröffentlichung und die darin enthaltenen Informationen wurden sorgfältig zusammengestellt und überprüft und sind als zum Zeitpunkt der Drucklegung zutreffend anzusehen. Für ihre Aktualität, Vollständigkeit, Qualität sowie Richtigkeit können wir dennoch keinerlei Gewähr oder Zusicherung übernehmen. Diese Veröffentlichung dient lediglich der Information und stellt keine Zusicherung von Eigenschaften dar. Dem Benutzer obliegt es, die Produkte zu untersuchen und mit der gebotenen Vorsicht zu benutzen sowie alle geltenden Gesetze und Verordnungen zu beachten. Sasol Wax GmbH übernimmt keinerlei Verantwortung oder Haftung insbesondere für den Fall, dass unsere Produkte falsch, ohne die notwendigen Vorsichtsmaßnahmen, entgegen Empfehlungen oder zweckentfremdet angewendet bzw. eingesetzt werden sowie für mit der Natur der Stoffe verbundene Gefahren. Es wird empfohlen, sich beim Hersteller zu informieren, insbesondere wenn das Produkt für andere als die in dieser Produktinformation beschriebenen Anwendungen genutzt werden soll. Im Übrigen gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen in der jeweils aktuellen Fassung.*

#### Sasol Wax GmbH

Worthdamm 13-27, 20457 Hamburg, Postanschrift: Postfach 11 02 49, 20402 Hamburg  
Telefon: +49 40 78115-0 Telefax: +49 40 78115-777 wax@de.sasol.com www.sasolwax.com

Geschäftsführung: Hendrik Edwin Vorsteveid

Registergericht Hamburg: HRB 73963 USt-IdNr./VAT No.: DE 118 922 039 Steuer-Nr./Tax-No. 27/164/00096



Nr.: 18 - Abkürzung: SSW3

## PRODUKTDATENBLATT

### SASOLWAX C80

Druckdatum: 18.04.2013

Letzte Änderung: 28.07.2009

Eigenschaft	Methode	Einheit	Spezifikation		
Analysenabschluss	Datenkontrolle		entspricht		
Erstarrungspunkt	DIN ISO 2207	°C	78,0	-	83,0
Ölgehalt	DIN-ISO 2908	%	0,00	-	0,75
Nadelpenetration 25°C	DIN 51579	1/10mm	0	-	7
Nadelpenetration 65°C	DIN 51579	1/10mm	0	-	0
Farbe Saybolt	ASTM D 156	-	15,0	-	30,0

*Diese Veröffentlichung und die darin enthaltenen Informationen wurden sorgfältig zusammengestellt und überprüft und sind als zum Zeitpunkt der Drucklegung zutreffend anzusehen. Für ihre Aktualität, Vollständigkeit, Qualität sowie Richtigkeit können wir dennoch keinerlei Gewähr oder Zusicherung übernehmen. Diese Veröffentlichung dient lediglich der Information und stellt keine Zusicherung von Eigenschaften dar. Dem Benutzer obliegt es, die Produkte zu untersuchen und mit der gebotenen Vorsicht zu benutzen sowie alle geltenden Gesetze und Verordnungen zu beachten. Sasol Wax GmbH übernimmt keinerlei Verantwortung oder Haftung insbesondere für den Fall, dass unsere Produkte falsch, ohne die notwendigen Vorsichtsmaßnahmen, entgegen Empfehlungen oder zweckentfremdet angewendet bzw. eingesetzt werden sowie für mit der Natur der Stoffe verbundene Gefahren. Es wird empfohlen, sich beim Hersteller zu informieren, insbesondere wenn das Produkt für andere als die in dieser Produktinformation beschriebenen Anwendungen genutzt werden soll. Im Übrigen gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen in der jeweils aktuellen Fassung.*

#### Sasol Wax GmbH

Worthdamm 13-27, 20467 Hamburg, Postanschrift: Postfach 11 02 49, 20402 Hamburg  
Telefon: +49 40 78115-0 Telefax: +49 40 78115-777 wax@de.sasol.com www.sasolwax.com

Geschäftsführung: Hendrik Edwin Vorsteveeld

Registergericht Hamburg: HRB 73963 USt-IdNr./VAT No.: DE 118 922 039 Steuer-Nr./Tax-No. 27/164/00096



Nr.: 19 - Abkürzung: LIC1302

Licocene® PP 1302 granules

Low-crystalline metallocene propylene-ethylene-copolymer

## SPECIFICATIONS

### Delivery Specifications and (\*) General Properties

Characteristics	Unit	Target value	Test method
Appearance		white granules	QM-AA-634
Drop point	[°C]	87 - 93	ASTM D 3954
Viscosity	[mPa·s]	150 - 250	DIN 53019 at 170 °C
*Density (23°)	[g/cm³]	~ 0,87	ISO 1183

Nr.: 20 - Abkürzung: LIC1602

Licocene® PP 1602 granules

Low-crystalline metallocene propylene-ethylene-copolymer

## SPECIFICATIONS

### Delivery Specifications and (\*) General Properties

Characteristics	Unit	Target value	Test method
Appearance		white granules	QM-AA-634
Viscosity	[mPa·s]	5000 - 7000	DIN 53019 at 170 °C
Softening point	[°C]	85 - 91	ASTM D 3104
*Density (23°C)	[g/cm³]	~ 0,87	ISO 1183

Nr.: 21 - Abkürzung: LIC2602

Licocene® PP 2602 granules

Low-crystalline metallocene propylene-ethylene-copolymer

## SPECIFICATIONS

### Delivery Specifications and (\*) General Properties

Characteristics	Unit	Target value	Test method
<b>Appearance</b>		white granules	QM-AA-634
<b>Viscosity</b>	[mPa·s]	5500 - 7000	DIN 53019 at 170 °C
<b>Softening point</b>	[°C]	95 - 102	ASTM D 3104
<b>*Density (23°C)</b>	[g/cm³]	~ 0,88	ISO 1183

Nr.: 22 - Abkürzung: LIC6102

Licocene® PP 6102 granules

Metallocene polypropylene wax

## SPECIFICATIONS

### Delivery Specifications and (\*) General Properties

Characteristics	Unit	Target value	Test method
<b>Appearance</b>		white granules	QM-AA-634
<b>Drop point</b>	[°C]	142 - 148	ASTM D 3954
<b>Viscosity</b>	[mPa·s]	50 - 70	DIN 53019 (170°C)
<b>*Density (23°C)</b>	[g/cm³]	~ 0,90	ISO 1183

Nr.: 23 - Abkürzung: VOE4706



**VÖLPKER® 4706**

## Produktinformation Product Information

**VÖLPKER® 4706** ist ein Spezialwachs auf Basis nachwachsender Wachse und synthetischer Polymere, die üblicherweise für den direkten Lebensmittelkontakt oder als Lebensmittelzusatzstoffe zugelassen sind. 4706 ist frei von Paraffin.

**VÖLPKER® 4706** is a special wax based on renewable waxes and synthetic polymers that are commonly approved for direct food contact or as food additives. 4706 is free of paraffin.

### Lieferspezifikationen

Säurezahl	< 5 mg KOH/g
Tropfpunkt	73–78 °C
Farbe	hellgelb
Lieferform	Schuppen oder Pastillen
Verpackung	Papiersack

### Delivery specifications

Acid value	< 5 mg KOH/g
Drop point	73–78 °C
Colour	pale yellow
Physical form	flakes or pastilles
Packing	paper bag

### Typische Daten und Eigenschaften

Erstarrungspunkt	ca. 50 °C
Viskosität	ca. 30–60 mPas; 100 °C
Dichte	ca. 0,90–1,02 g/cm³

### Typical data and properties

Solidification point	approx. 50 °C
Viscosity	approx. 30–60 mPas; 100 °C
Density	approx. 0.90–1.02 g/cm³

### Anwendungsbeispiele

Wachspapier für flexible Verpackungen, z. B. Süßwaren (Toffees, Bonbons etc.).

### Examples of application

Waxed paper for flexible packaging, for example confectionery products (toffees, candies etc.).

### Lebensmittelrechtliche Stellung

Produkt für Lebensmittelkontakt und technische Anwendungen.

### Food legislation status

Product for food contact and technical applications.

Diese Informationen und Empfehlungen entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse. Eine Zusage der Richtigkeit oder Zuverlässigkeit dieser Angaben im rechtlichen Sinne kann jedoch nicht abgeleitet werden. Etwasige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Empfänger unserer Produkte in eigener Verantwortung zu beachten. Die durch die Völpker Spezialprodukte GmbH erteilten Informationen entbinden nicht von der Pflicht, Eingangskontrollen durchzuführen.

Stand: 2009-12-10, ersetzt alle vorherigen Versionen

Völpker Spezialprodukte GmbH · Fabrikstraße 1 · 39393 Völpke · Deutschland · Telefon +49 39402 962-0 · [www.voelpkker.com](http://www.voelpkker.com)

The information and recommendations contained herein are believed to be accurate and reliable as of date of issue. However, we do not warrant their accuracy or reliability. It is the responsibility of those to whom we supply our products to ensure that any existing laws, legislation and proprietary rights are observed. The information given by Völpker Spezialprodukte GmbH does not exempt the customer from carrying out checks on goods purchased.

Issued: 2009-12-10, supersedes all previous editions



Nr.: 24 - Abkürzung: VOE6628



**VÖLPKER® 6628**

## Produktinformation Product Information

VÖLPKER® 6628 ist ein auf Naturwachsen basierendes Spezialwachs.

VÖLPKER® 6628 is a special wax based on natural waxes.

### Lieferspezifikationen

Säurezahl	140–185 mg KOH/g
Tropfpunkt	65–75 °C
Farbe	gelb
Lieferform	Schuppen oder Pastillen
Verpackung	Papiersack

### Delivery specifications

Acid value	140–185 mg KOH/g
Drop point	65–75 °C
Colour	yellow
Physical form	flakes or pastilles
Packing	paper bag

### Typische Daten und Eigenschaften

Erstarrungspunkt	57–63 °C
Viskosität	ca. 5 mPas; 120 °C
Verseifungszahl	170–210 mg KOH/g

### Typical data and properties

Solidification point	57–63 °C
Viscosity	approx. 5 mPas; 120 °C
Saponification value	170–210 mg KOH/g

### Anwendungsbeispiele

Lederfinishing: Pull-up-Wachs für die Anwendung auf beheizbaren Walzenauftragsmaschinen; ergibt dunkle Pull-up-Effekte und gute Hydrophobierung. VÖLPKER® 6628 ist mit Paraffin(-öl) oder Klauenöl mischbar. Trennmittel, z. B. für Phenolharze und Kunststoffe.

### Examples of application

Leather finishing: Pull-up wax for heated roller coater application; gives dark pull-up effects and good hydrophobicity. VÖLPKER® 6628 is miscible with paraffin(-oil) or neat's foot oil. Release agent, e.g. for phenolic resins and plastics.

### Lebensmittelrechtliche Stellung

Produkt für technische Anwendungen.

### Food legislation status

Product for technical applications.

Diese Informationen und Empfehlungen entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse. Eine Zusicherung der Richtigkeit oder Zuverlässigkeit dieser Angaben im rechtlichen Sinne kann jedoch nicht abgeleitet werden. Etwasige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Empfänger unserer Produkte in eigener Verantwortung zu beachten. Die durch die Völper Spezialprodukte GmbH erteilten Informationen entbinden nicht von der Pflicht, Eingangskontrollen durchzuführen.

Stand: 2013-05-22, ersetzt alle vorherigen Versionen

Völper Spezialprodukte GmbH · Fabrikstraße 1 · 39393 Völper · Deutschland · Telefon +49 39402 962-0 · [www.voelper.com](http://www.voelper.com)

The information and recommendations contained herein are believed to be accurate and reliable as of date of issue. However, we do not warrant their accuracy or reliability. It is the responsibility of those to whom we supply our products to ensure that any existing laws, legislation and proprietary rights are observed. The information given by Völper Spezialprodukte GmbH does not exempt the customer from carrying out checks on goods purchased.

Issued: 2013-05-22, supersedes all previous editions



Nr.: 25 - Abkürzung: VOE8014



## VÖLPKER® 8014

## Produktinformation Product Information

CAS No.: 8002-74-2; 73138-44-0

**VÖLPKER® 8014** ist ein Spezialwachs auf Montanwachs-Basis, bestehend aus langkettigen Fettsäuren (hauptsächlich C16–C30), teilweise verestert, und Kohlenwasserstoffwachsen.

**VÖLPKER® 8014** is a special wax, based on montan waxes, consisting of long-chain fatty acids (mainly C16–C30), partially esterified, and hydrocarbon waxes.

### Lieferspezifikationen

Säurezahl	20–30 mg KOH/g
Verseifungszahl	65–75 mg KOH/g
Tropfpunkt	70–80 °C
Farbe	hellgelb
Lieferform	Schuppen oder Pastillen
Verpackung	Papiersack

### Delivery specifications

Acid value	20–30 mg KOH/g
Saponification value	65–75 mg KOH/g
Drop point	70–80 °C
Colour	pale yellow
Physical form	flakes or pastilles
Packing	paper bag

### Typische Daten und Eigenschaften

Erstarrungspunkt	ca. 65–70 °C
Viskosität	ca. 5–15 mPas; 120 °C
Dichte	< 1 g/cm³
Penetrometerzahl	< 1 dmm

### Typical data and properties

Solidification point	approx. 65–70 °C
Viscosity	approx. 5–15 mPas; 120 °C
Density	< 1 g/cm³
Penetration value	< 1 dmm

### Anwendungsbeispiele

Pflegemittelmulsionen, insbesondere Polituren, Hydrophobierungsmittel.

### Examples of application

Emulsion polishes, water-proofing.

### Lebensmittelrechtliche Stellung

Produkt für technische Anwendungen.

### Food legislation status

Product for technical applications.

Diese Informationen und Empfehlungen entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse. Eine Zusicherung der Richtigkeit oder Zuverlässigkeit dieser Angaben im rechtlichen Sinne kann jedoch nicht abgeleitet werden. Etwaige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Empfänger unserer Produkte in eigener Verantwortung zu beachten. Die durch die Völpker Spezialprodukte GmbH erteilten Informationen entbinden nicht von der Pflicht, Eingangskontrollen durchzuführen.

Stand: 2011-12-21, ersetzt alle vorherigen Versionen

Völpker Spezialprodukte GmbH · Fabrikstraße 1 · 39393 Völpke · Deutschland · Telefon +49 39402 962-0 · www.voelpkier.com

The information and recommendations contained herein are believed to be accurate and reliable as of date of issue. However, we do not warrant their accuracy or reliability. It is the responsibility of those to whom we supply our products to ensure that any existing laws, legislation and proprietary rights are observed. The information given by Völpker Spezialprodukte GmbH does not exempt the customer from carrying out checks on goods purchased.

Issued: 2011-12-21, supersedes all previous editions



Nr.: 26 - Abkürzung: VOE6548-V2

6548 V2 ohne PI

6548 V2 (Charge: W00005774)  
TP = 102,6 °C

Nr.: 27 - Abkürzung: MORFr

### **Technisches Datenblatt :**

Zur Herstellung von Totalprothesen – Wachseinprobe auf digitalem Weg basierend auf einem CAD / CAM System

#### **Technische Daten:**

Chemische Zusammensetzung:	Synthetisches Wachs
Geruch:	Geruchslos
Farbe:	Gingiva / rosa
Tropfpunkt:	80 -130 °C
Dichte:	0,92-0,97 g/cm <sup>3</sup>
Flammpunkt:	Nicht anwendbar
Löslichkeit im Wasser:	unlöslich
Säurezahl (mg KOH/g)	Sollwert: 0 0 ISO 2114

**Die wachshefteten Konstruktionen aus dieser Wachstank sind für eine kurze Verweildauer im Mund des Patienten zur Einprobe ausgelegt.**

**Die „Prothese“ darf im Mund platziert werden, um wichtige Punkte wie Mittel- Eckzahn-Lachlinie, etc. zu definieren. Die Einprobe sollte eine Verweildauer über zwei Stunden nicht überschreiten.**


**Vor der Wachseinprobe unbedingt desinfizieren!**



Nordstraße 3  
D-86381 Krumbach  
Tel: +49 09262 800 44-0  
Fax: +49 09262 800 44-33  
info@morsa.de;www.morsa.de



Nr.: 28 - Abkürzung: MACO



Paramelt B.V. • Heerhugowaard • The Netherlands  
Tel. +31 72 575 06 00 • Fax +31 72 575 06 99  
Paramelt Veendam B.V. • Veendam • The Netherlands  
Tel. +31 598 662 500 • Fax +31 598 662 550  
e-mail: info@paramelt.com • www.paramelt.com

Technical Data Sheet

**MACO (EU)**

PRODUCT

Technical Data	Method	Specifications
Drop melting point	ASTM D 3954	66 - 76 °C.
Congeaing point	ASTM D 938	Approx. 60 °C.
Penetration at 25 °C.	ASTM D 1321	Approx. 10 *0.1mm
Viscosity at 90 °C.	ASTM D 3236	Approx. 69 mPa.s
Viscosity at 100 °C.	ASTM D 3236	Approx. 48 mPa.s
Ash content	-	Max. 0.03 %

Nr.: 29 - Abkürzung: SH

## STEINHART - BEREICH WACHSFOLIEN



<u>Produktbezeichnung:</u>	STEINHART SH 60° C 450 x 1000 mm	
<u>Produktbeschreibung:</u>	rote Folie, geeignet für die Anwendungsbereiche im Modellbau bis 60 ° C	
<u>Eigenschaften:</u>	<ul style="list-style-type: none"><li>- für großflächige Modelle</li><li>- geschmeidig, daher leicht verlegbar</li><li>- Material schnitt- und hobelfähig</li><li>- Temperaturbereich bis 60 ° C</li></ul>	
<u>Anwendungsschwerpunkt:</u>	Holz- und Kunststoffmodelle	
<u>lieferbare Abmessungen:</u>	<p>1. Format: 450 x 1000 mm =&gt; Stärken: 0,5 bis 4,0 mm =&gt; <u>ohne</u> Klebeschicht</p> <p>2. Format: 450 x 500 mm =&gt; Stärken: 5,0 und 6,0 mm =&gt; <u>ohne</u> Klebeschicht</p>	
<u>Verpackungseinheiten:</u>	bis Stärke 1,0 mm =>	12 Stück/Karton
	bis Stärke 2,0 mm =>	8 Stück/Karton
	bis Stärke 2,5 mm =>	6 Stück/Karton
	bis Stärke 4,0 mm =>	4 Stück/Karton
	bis Stärke 5,0 mm =>	3 Stück/Karton
	bis Stärke 6,0 mm =>	2 Stück/Karton

---

Gebr. Steinhart Wachwarenfabrik GmbH & Co. KG  
Buchstraße 20  
D-86381 Krumbach



## Versuchsprotokoll:

Titel:	Überprüfung der Fräsbarkeit von unterschiedlichen Wachsen anhand einer Referenzgeometrie
Versuchsnummer:	ITE_140301
Datum:	03.-08.2014
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Jeldrik Mainka / Elena Stein

### 1. Ziel des Versuchs / Erwartete Ergebnisse:

Der Versuch dient der generellen Prüfung der Fräsbarkeit von unterschiedlichen Wachsen, um diese z.B. durch Fräsen in eine bestimmte Form zu bringen, damit sie als Schalungskörper für Betonelemente dienen könnten. Durch das Herausfräsen einer definierten Referenzgeometrie aus den unterschiedlichen Wachsproben werden dabei die folgenden qualitativen Ergebnisse erwartet, welche als Bewertungsgrundlage zur Einordnung sowie einem Vergleich der Wachse untereinander dienen sollen:

1. Das zu untersuchende Wachs ist fähig / nicht fähig mittels eines rotierenden Fräswerkzeuges geschnitten und somit in eine definierte Form gebracht zu werden.
2. Das zu untersuchende Wachs ist fähig / nicht fähig die amorphe parabelförmige unidirektional gekrümmte Fläche (1) der Referenzgeometrie detailgetreu abzubilden, ohne dass Wachsreste an der Oberfläche verbleiben.
3. Das zu untersuchende Wachs ist fähig / nicht fähig den von 10° auf 2° zulaufenden scharfen Grat (2) der Referenzgeometrie detailgetreu abzubilden, ohne dass dieser abbricht oder dass Wachsreste an der Oberfläche verbleiben.
4. Das zu untersuchende Wachs ist fähig / nicht fähig die unterschiedlichen geometrischen Körper wie: Stufen, Zylinderbohrungen, Dreieckszylinder hinsichtlich der zu erzeugenden scharfen Kanten detailgetreu abzubilden, ohne dass z.B. diese abbrechen oder sich in den Bohrungen Wachs anlagert.
5. Das zu untersuchende Wachs ist fähig / nicht fähig den allgemeinen mechanischen Belastungen des Fräsprozesses standzuhalten, ohne z.B. in Gänze aufzubrechen.

## 2. Materialien und Grundlagen

### 2.1. Wachse

29 aus unterschiedlichen Wachsen gegossene Wachsblöcke mit den Abmessungen 120mm x 120mm x 50mm. Die im Versuch verwendeten Wachse einschließlich ihrer relevanten Parameter sind in Abschnitte 5: Zusammenfassende Auswertung und Resümee (Tabelle 1) aufgeführt.

### 2.2. Fräse

Roland Modela MDX 40 – 3 Achs Modellbaufräse

### 2.3. Fräser

Firma VHF Einzahnfräser Typ ES-SC-0600-6-250-60 SHC, Durchmesser 6 mm mit SHC® - Kohlenstoffbeschichtung. Da Wachse den Kunststoffen ähneln, wurden in Analogie zur Kunststofffräsbearbeitung Fräser mit wenig Schneiden und einem großen Spiral-, bzw. Drallwinkel (flache Steigung der Spirale) gewählt. Dieses ermöglicht es den Span sauber vom Material abzutrennen / abzuschneiden und über den Freiraum der Spirale des Fräfers vom Werkstück abzuführen. Ein Vorversuch am ITE mit unterschiedlichen Einzahnfräsern hat dabei ergeben, dass sich der Fräser Typ ES-SC-0600-6-250-60 SHC (Versuch 14001 - Verhalten verschiedener Einzahnfräsköpfe bei Wachs) grundlegend am besten für die Bearbeitung von Wachs eignet, weswegen dieser Fräser für den hier vorliegenden Versuch ausgewählt wurde. Aus diesem Versuch wurden zudem geeignete Prozessparameter: Drehzahl, Vorschub und Schnittmenge abgeleitet.



Bild: Verwendeter VHF Einzahnfräser Typ ES-SC-0600-6-250-60 SHC

### 2.4. Referenzgeometrie

Die unterhalb dargestellte Referenzgeometrie (Datei: 121130 Wachs Probekörper Frästest-JM3.3dm) stellt unterschiedliche geometrische Anforderungen an ein zu fräsendes Material: Die Hauptbereiche der Geometrie unterteilen sich in:

- (1) amorphe parabelförmige unidirektional gekrümmte Fläche
- (2) Mit unterschiedlichen Winkeln von 5° auf 60° zulaufender scharfer Grat
- (3) Stufen, Zylinderbohrungen und Dreieckszylinder mit scharfen Kanten

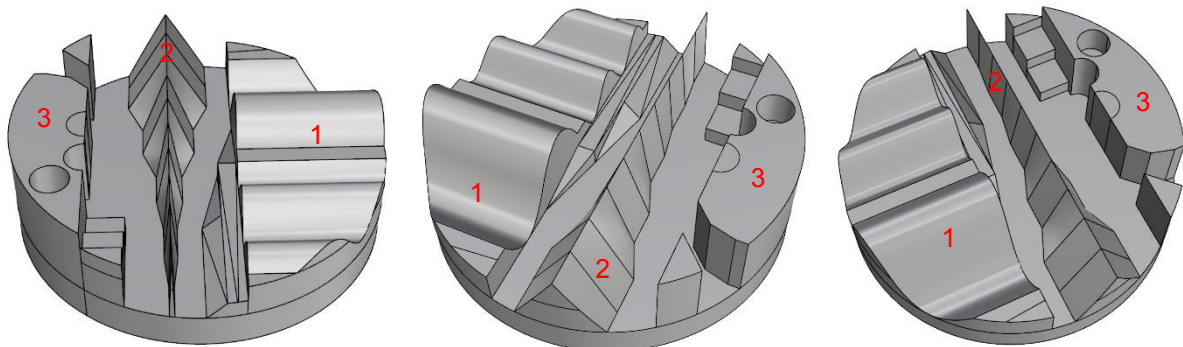


Bild: Perspektivische Ansicht der Referenzgeometrie, Durchmesser 100mm / Höhe 30mm

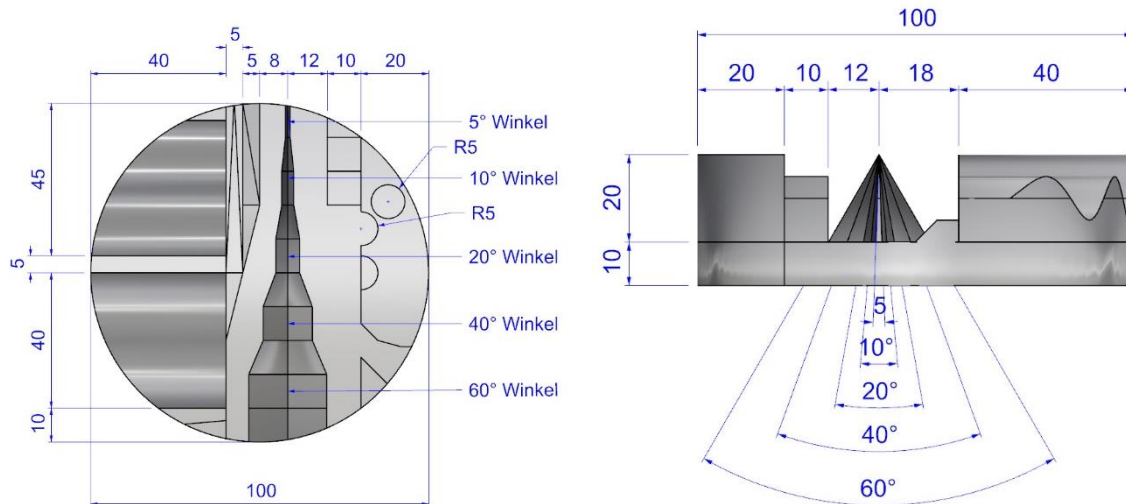


Bild: Drauf- und Ansicht der Referenzgeometrie mit relevanten Maßen

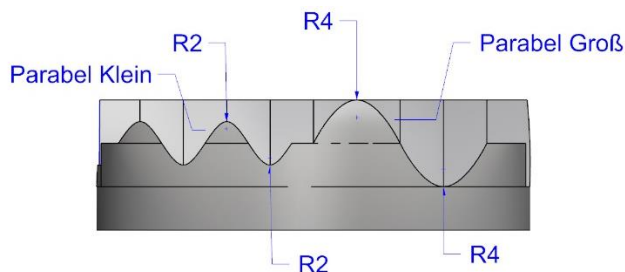


Bild: Seitenansicht der Referenzgeometrie mit parabelförmigen unidirektional gekrümmten Flächen

### 3. Versuchsaufbau und Durchführung

In eine Holzschalung aus 21 mm starkem filmbeschichtetem Furniersperrholz mit einer inneren Grundfläche von 120mm x 120 mm und einer Höhe von 50 mm wird jeweils das flüssige geschmolzene Wachs (Tropfpunkttemp. +10°C) gegossen und bei Raumtemperatur abgekühlt. Die Furniersperrholzbodenplatte ist jeweils mit 4 Holzschrauben (Durchmesser 4 mm) von unten her durchgeschraubt, die etwa 10 mm aus der Platte herausstehen und mit dem abkühlenden Wachs eine mechanische Verbindung herstellen. Der vollständig abgekühlte und ausgehärtete Wachsblock wird mithilfe von doppelseitigem Klebeband in der Fräse befestigt. Anschließend erfolgt der Fräsvorgang bei etwa 20°C in 3 Schritten, mit den wie im Folgenden dargestellten Fräsparametern:

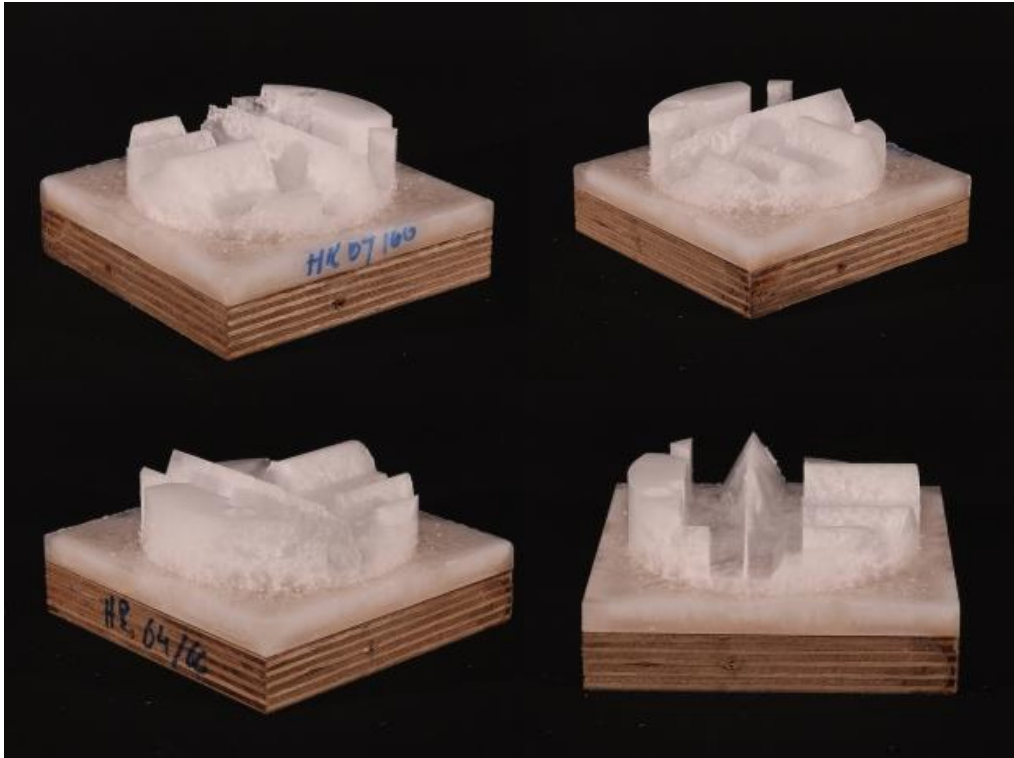
Tabelle 1: Verwendete Fräsparameter

Prozessschritt	XY-Geschwindigkeit [mm/sec]	Z-Geschwindigkeit [mm/sec]	Spindel [1/min]	Schnittmenge [mm]	Pfadabstand [mm]	Schlichtzugabe [mm]	Dauer [min]
Planfräsen	40	10	8000	5	3,6	0	
Aufräuen	40	10	8000	5	3	0,5	11
Endbearbeiten	50	10	8000	0,1	0,1	0	120

Im letzten Arbeitsschritt wird die fertig gefräste Geometrie dokumentiert und bewertet.

#### 4. Ergebnisbeschreibung je Wachs

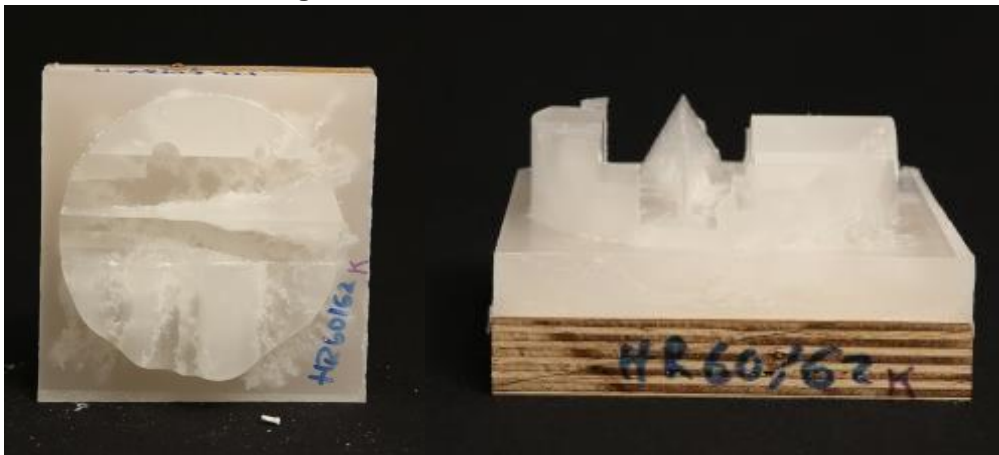
##### 4.1. Nr.: 1 - Abkürzung: HR64-66



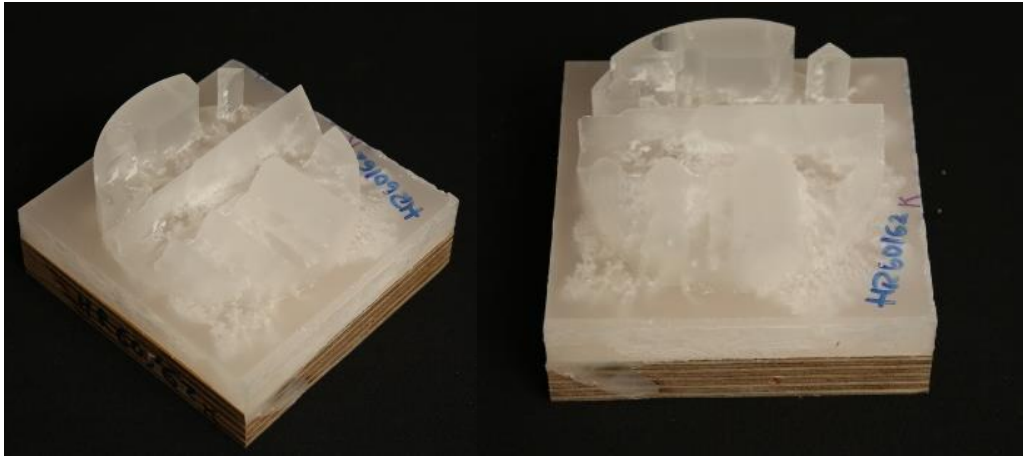
Obwohl die Referenzgeometrie komplett gefräst werden konnte, lässt sich HR64-66 nur bedingt fräsen, da es zum Zusetzen bzw. zum Verkleben des Fräasers neigt. Zudem erzeugt das stark porige Gefüge des ausgehärteten Wachskörpers Defizite in der Oberflächenstruktur. Des Weiteren haften die Späne an allen gefrästen Oberflächen und das Ablösen der haftenden Späne ist schwierig.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs HR64-66 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft.

##### 4.2. Nr.: 2 - Abkürzung: HR60-62



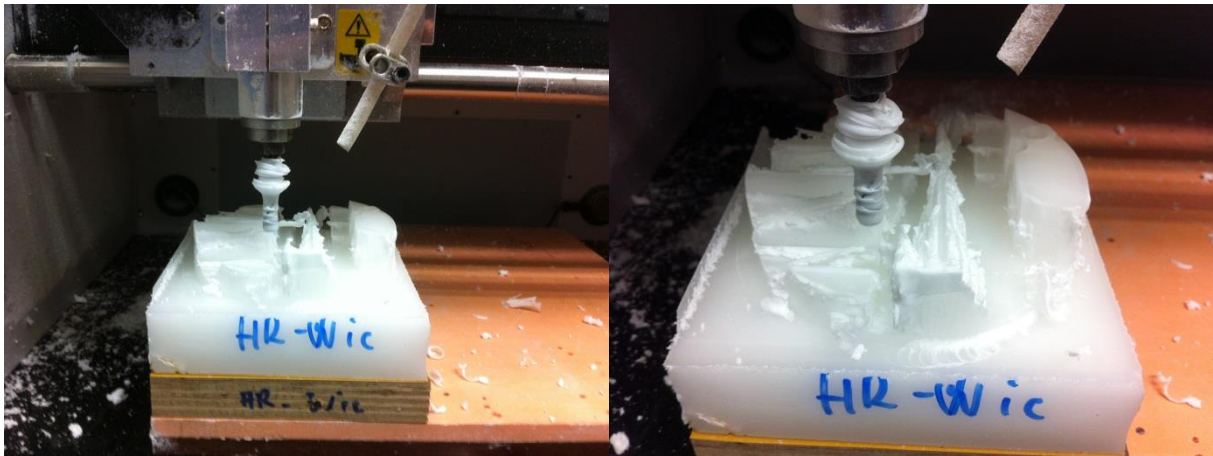




Obwohl die Referenzgeometrie komplett gefräst werden konnte, lässt sich HR60-62 nur bedingt fräsen, da es zum Zusetzen bzw. zum Verkleben des Fräasers neigt. Zudem erzeugt das stark porige Gefüge des ausgehärteten Wachskörpers Defizite in der Oberflächenstruktur. Des Weiteren haften die Späne an allen gefrästen Oberflächen und das Ablösen der haftenden Späne ist schwierig.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs HR60-62 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft.

#### 4.3. Nr.: 3 - Abkürzung: HR-Wic



Das Wachs HR-Wic ist nicht für die Herstellung von CNC gefrästen Schalungen geeignet, da es aufgrund seiner Weichheit und Klebrigkeit nicht mittels eines rotierenden Fräswerkzeuges bei Raumtemperatur geschnitten werden kann. Dieses lässt sich wahrscheinlich auf die relativ geringe Härte in Kombination mit einem Ölgehalt von 0,8% zurückführen.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs HR-Wic für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft.

4.4. Nr.: 4 - Abkürzung: KW2811

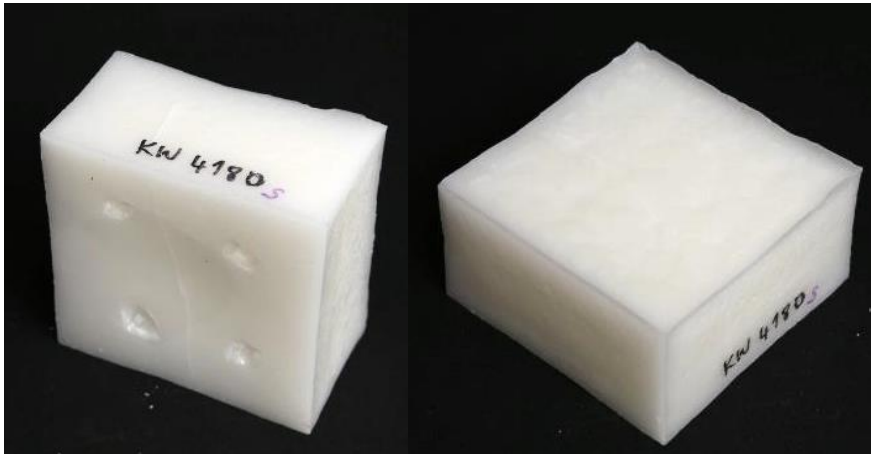


Aus dem Wachs Kahlwax KW2811 der Firma Kahl konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden, wobei sich das Wachs ohne Zusetzen bzw. Verkleben des Fräasers bearbeiten ließ. Ebenfalls konnten keine Anhaftungen von Wachspänen an den Oberflächen der Referenzgeometrie festgestellt werden. Schwächen weist das Wachs bei der Herstellung des scharfen Grats auf. Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Die Späne ähneln Staub, obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm Tiefe gefräst wurde.

Nachteilig bei diesem Wachs scheint seine hohe Sprödhheit zu sein, die zu einem leichten Abbrechen filigraner geometrischer Elemente führt. Zudem zeigt das Wachs nach dem Gießen relativ große Risse, welche das Abbrechen einzelner gefräster Elemente begünstigen und zu einer Oberflächenbeeinträchtigung führen.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs KW2811 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu spröde“** eingestuft.

#### 4.5. Nr.: 5 - Abkürzung: KW4180



Der Wachsblock ist nach dem Gießen so spröde, dass er nicht an der Trägerplatte hält. Diese bricht nach dem Ausschalen ohne große Kraftanstrengung ab.

Das Wachs KW4180 von der Firma Kahl eignet sich nicht für das Herstellen von Schalungswachsen. Schon bei der Herstellung eines Wachsblockes, aus dem dann eine entsprechende Geometrie gefräst werden könnte, zeigt sich ein sehr sprödes Verhalten des Materials. Der Block hält nicht an der Trägerplatte und so kann er gar nicht erst gefräst werden.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs KW4180 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu spröde“** eingestuft.

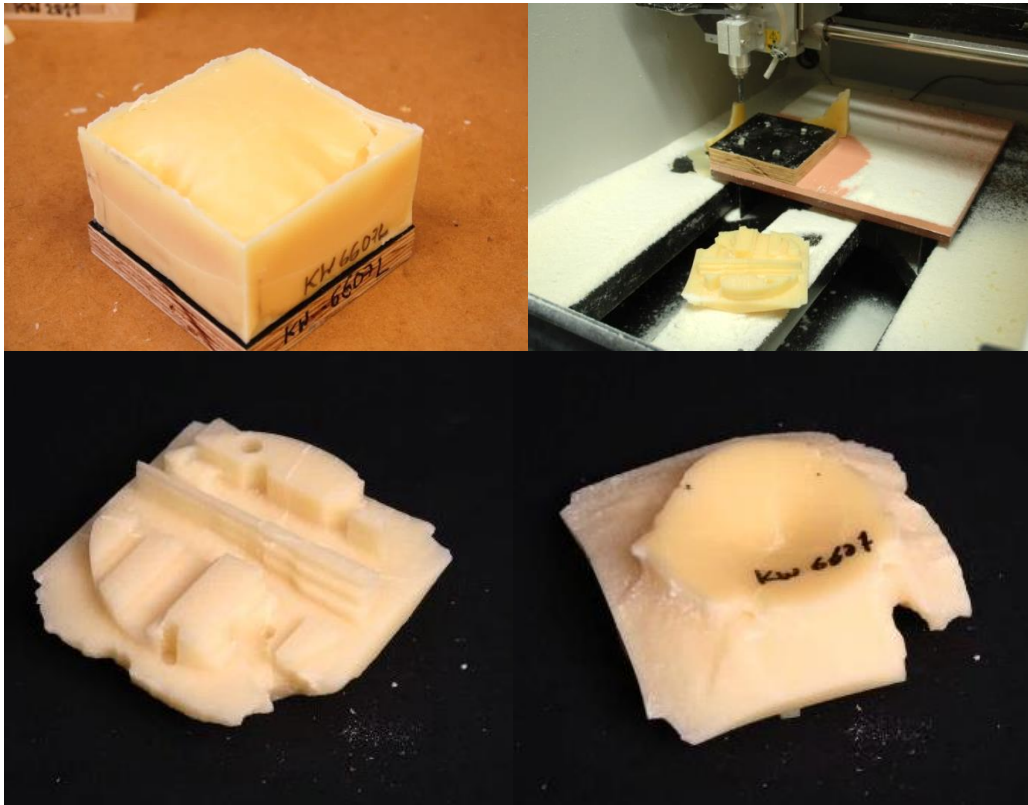
#### 4.6. Nr.: 6 - Abkürzung: KW5023



Schon bei der Herstellung eines Wachsblockes zeigt das Wachs KW5023 beim Erhärten des flüssigen Wachses durch Oberflächenrisse und Schrumpf sein sehr sprödes Verhalten. Nach dem Ausschalen kann der Wachsblock ohne großen Kraftaufwand per Hand auseinandergenommen werden bzw. zerfällt in einzelne Brocken.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs KW5023 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu spröde“** eingestuft.

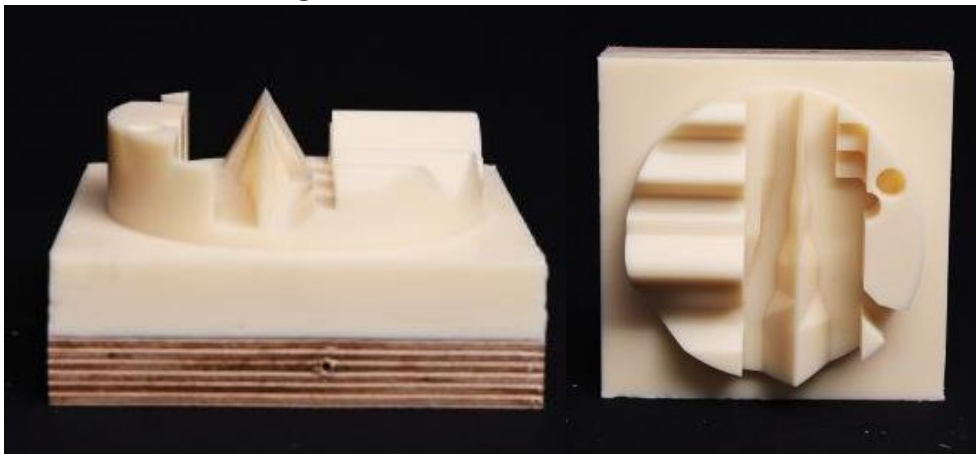
4.7. Nr.: 7 - Abkürzung: KW6607L



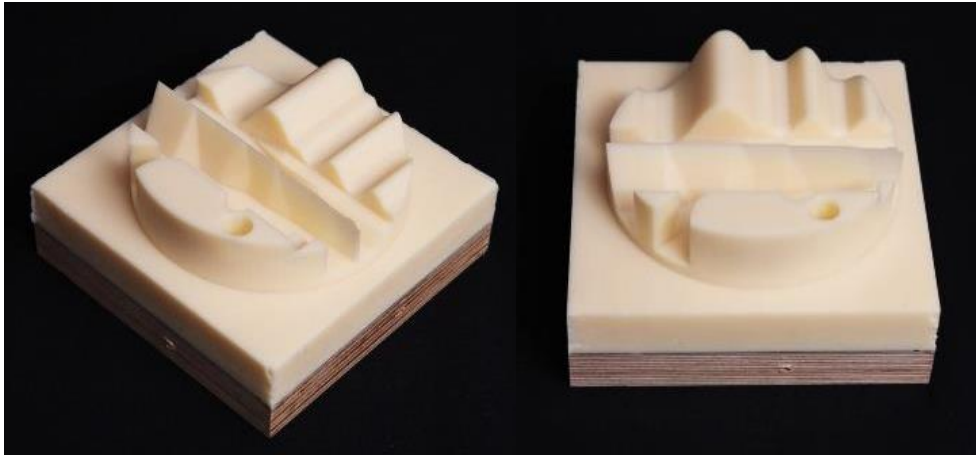
Das Wachs KW6607L der Firma Kahl eignet sich anscheinend für das Fräsen von Geometrien unterschiedlicher Komplexität. Allerdings ist das Material sehr spröde und beim Gießen des Wachsblockes entstand ein großer Hohlraum am Boden des Probekblocks und Löcher an der Oberseite. Dadurch ist der Block beim Fräsen auseinandergebrochen und konnte nicht vollständig gefräst werden.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs KW6607L für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu spröde“** eingestuft.

4.8. Nr.: 8 - Abkürzung: CFW



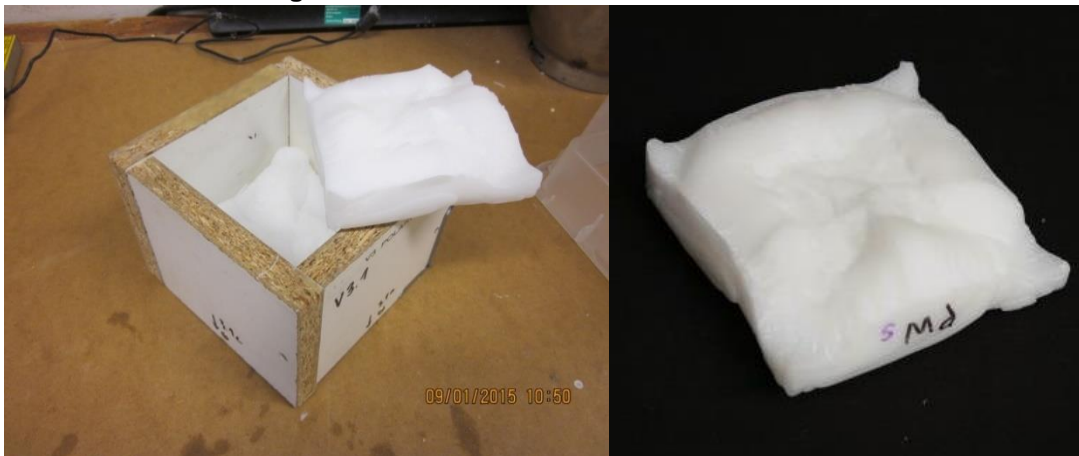




Aus dem Wachs CFW der Firma TROMM konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden. Beim Fräsen konnte beobachtet werden, dass das Spanverhalten sehr gut zu sein scheint (große Schnittspäne) und es zu keinem Verkleben oder Zusetzen des Fräasers kommt. Da ebenfalls die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass CFW auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte. Die o.g. Fräsparemeter bieten darüber hinaus Möglichkeit zur Optimierung.

Aufgrund dieser guten Ergebnisse wird das Wachs CFW für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.

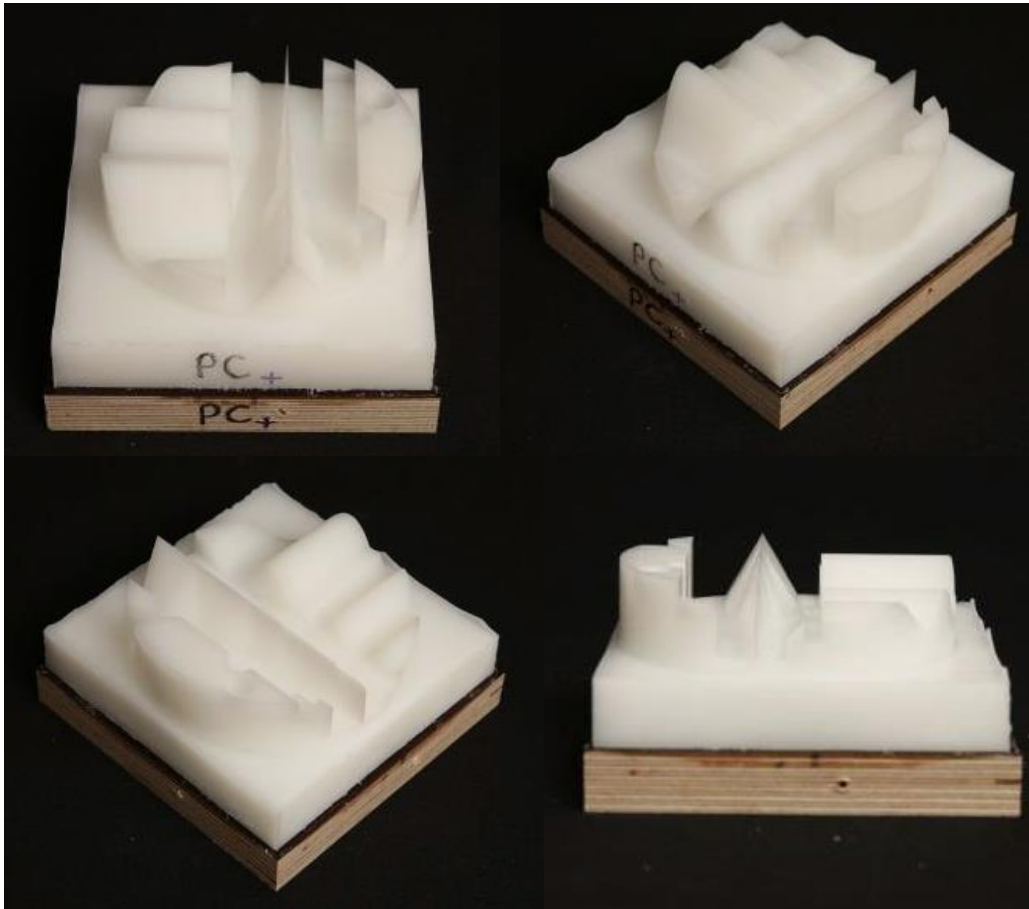
#### 4.9. Nr.: 9- Abkürzung: PW



Schon bei der Herstellung eines Wachsblockes zeigt das Wachs PW von der Firma TROMM beim Erhärten des flüssigen Wachses durch Oberflächenrisse und Schrumpf sein sehr sprödes Verhalten. Nach dem Ausschalen kann der Wachsblock ohne großen Kraftaufwand per Hand auseinandergenommen werden bzw. zerfällt in Brocken.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs PW für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu spröde“** eingestuft

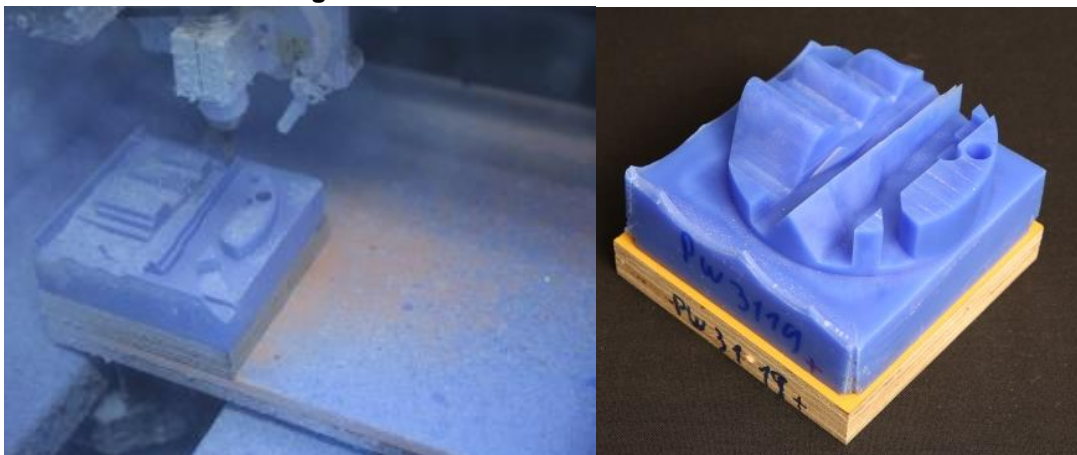
**4.10. Nr.: 10 - Abkürzung: PC**



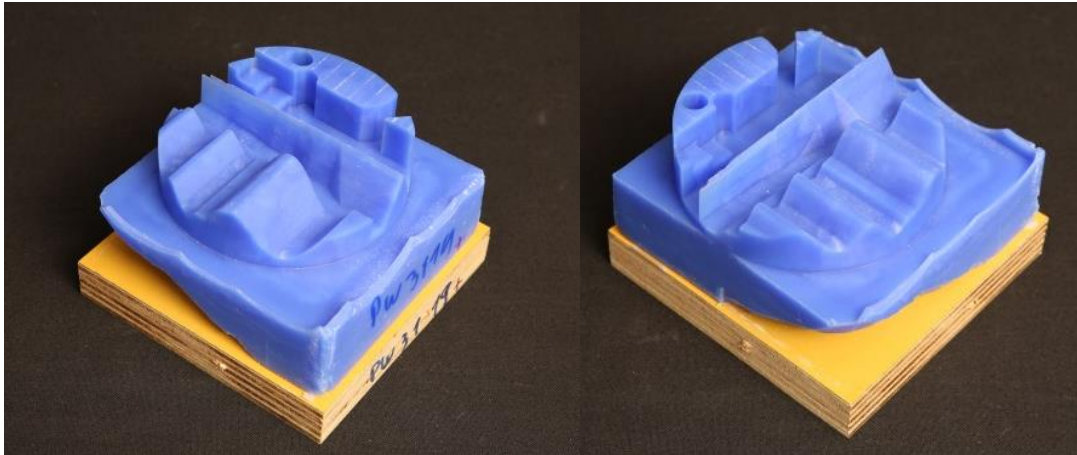
Aus dem Wachs PC der Firma TROMM konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden. Da ebenfalls die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass CFW auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte.

Aufgrund dieser guten Ergebnisse wird das Wachs PC für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.

**4.11. Nr.: 11 - Abkürzung: PW3119**





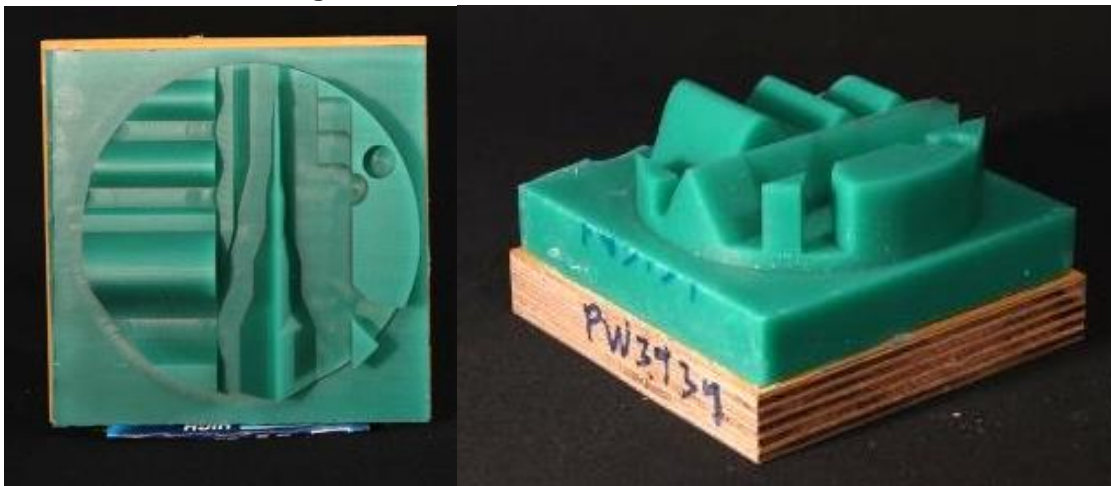


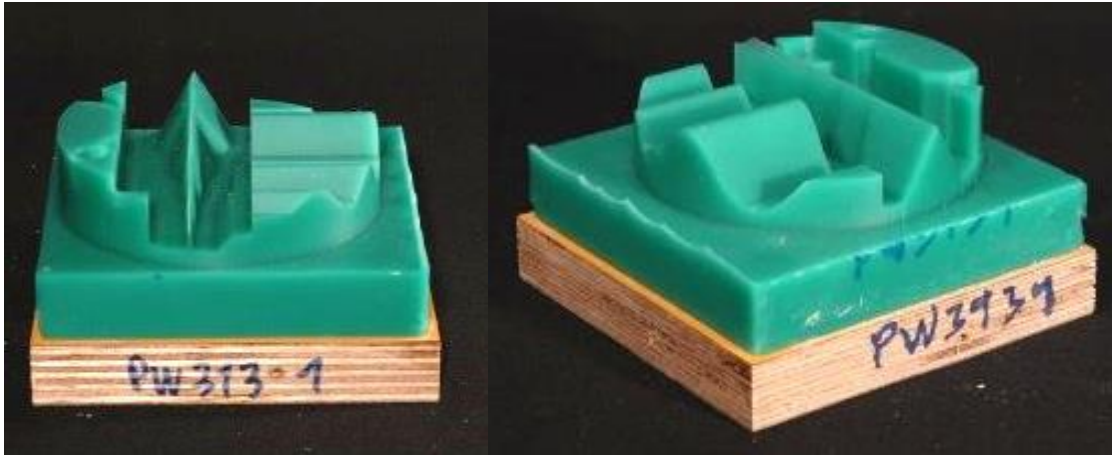
Aus dem Wachs PW3119 der Firma Romonta konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden. Da ebenfalls die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass PW3119 auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte.

Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm gefräst wurde, ähneln die Späne Staub, welcher sich aufgrund seiner Feinheit in der gesamten Fräse verteilt und besonders die Antriebe zugesetzt hat.

Trotzdem wird aufgrund der überwiegend guten Ergebnisse das Wachs PW3119 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.

#### 4.12. Nr.: 12 - Abkürzung: PW3139



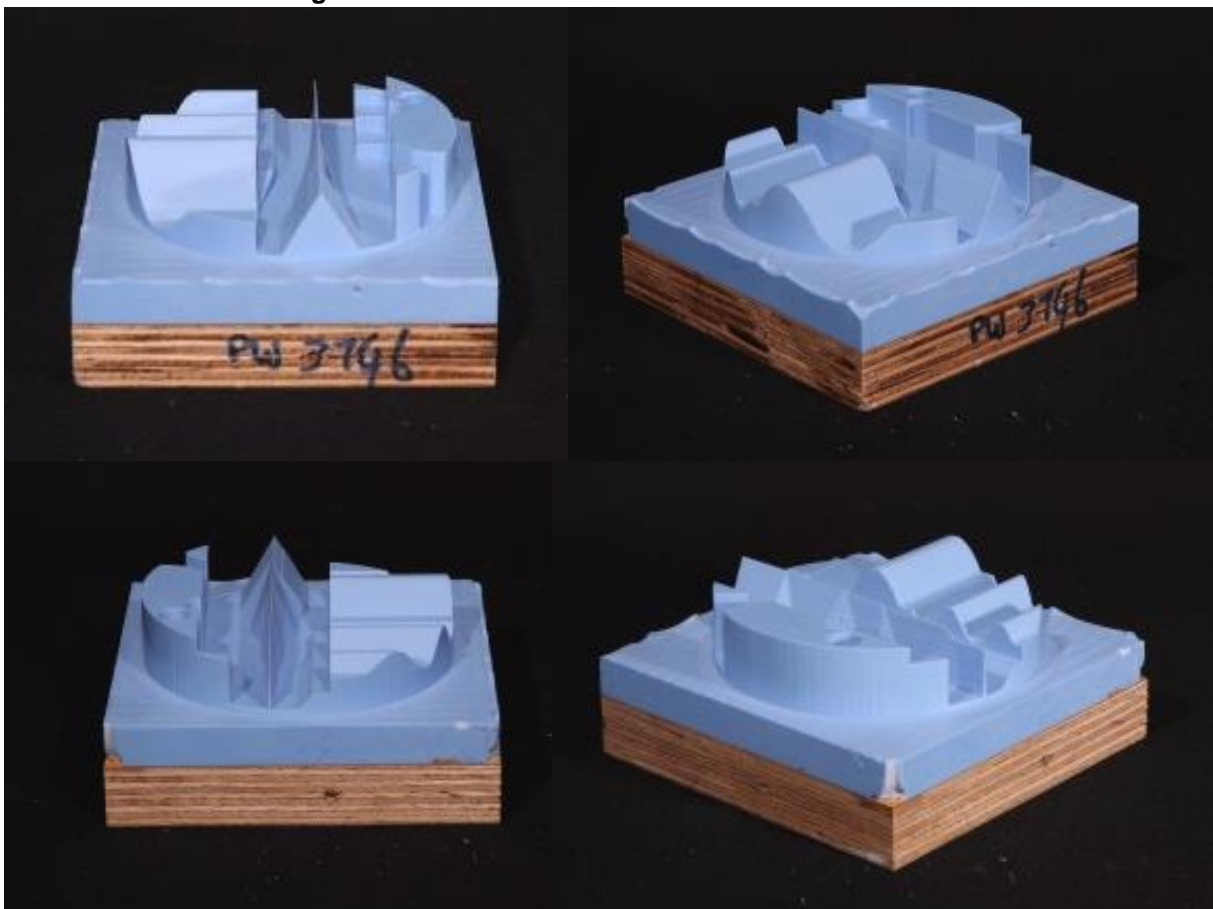


Aus dem Wachs PW3139 der Firma Romonta konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden. Da ebenfalls die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass PW3139 auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte.

Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Obwohl mit einer Schnittmenge von 5mm gefräst wurde, ähneln die Späne Staub, welcher sich aufgrund seiner Feinheit in der gesamten Fräse verteilt und besonders die Antriebe zugesetzt hat.

Trotzdem wird aufgrund der überwiegend guten Ergebnisse das Wachs PW3139 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.

#### 4.13. Nr.: 13 - Abkürzung: PW3146

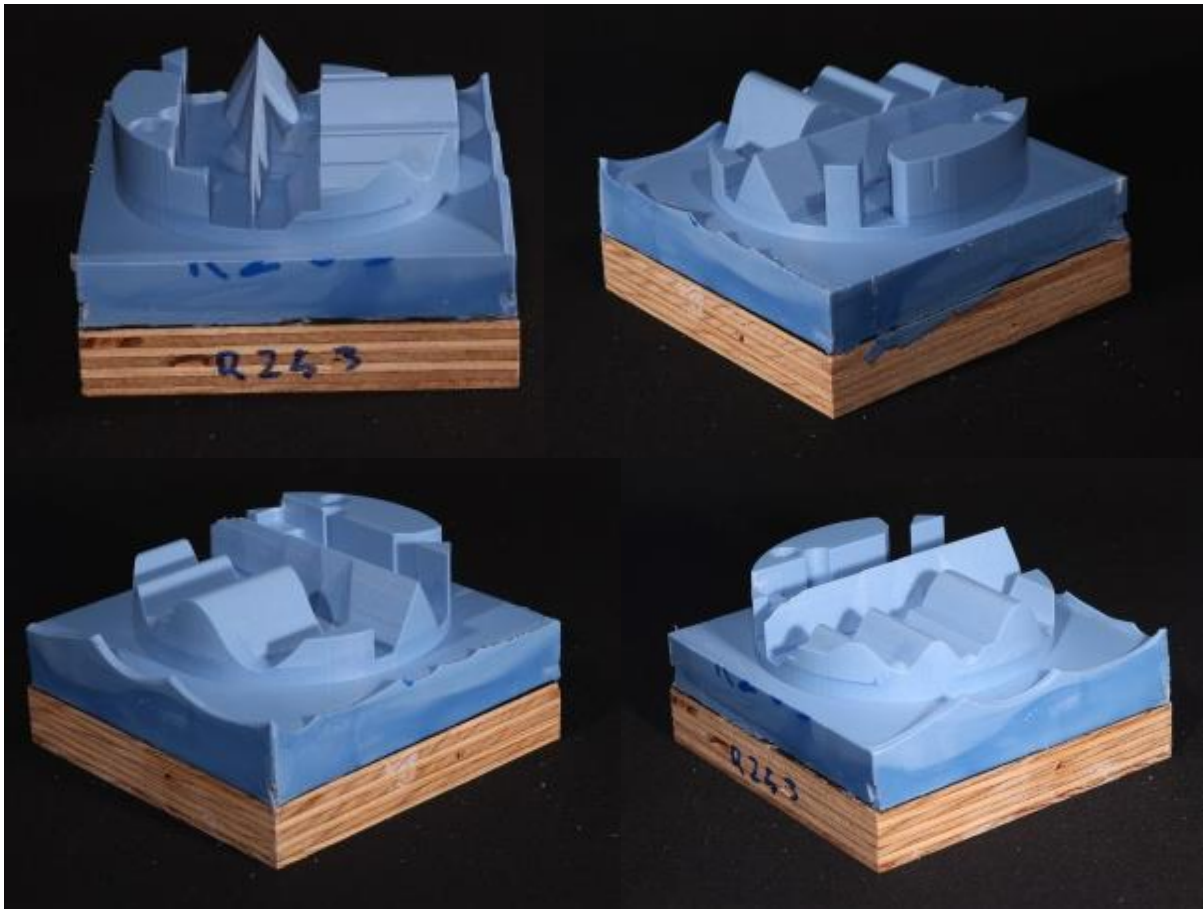


Aus dem Wachs PW3146 der Firma Romonta konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden. Da ebenfalls die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass PW3146 auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte.

Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm gefräst wurde, ähneln die Späne Staub, welcher sich aufgrund seiner Feinheit in der gesamten Fräse verteilt und besonders die Antriebe zugesetzt hat.

Trotzdem wird aufgrund der überwiegend guten Ergebnisse das Wachs PW3146 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.

### 4.14. Nr.: 14 - Abkürzung: RC253

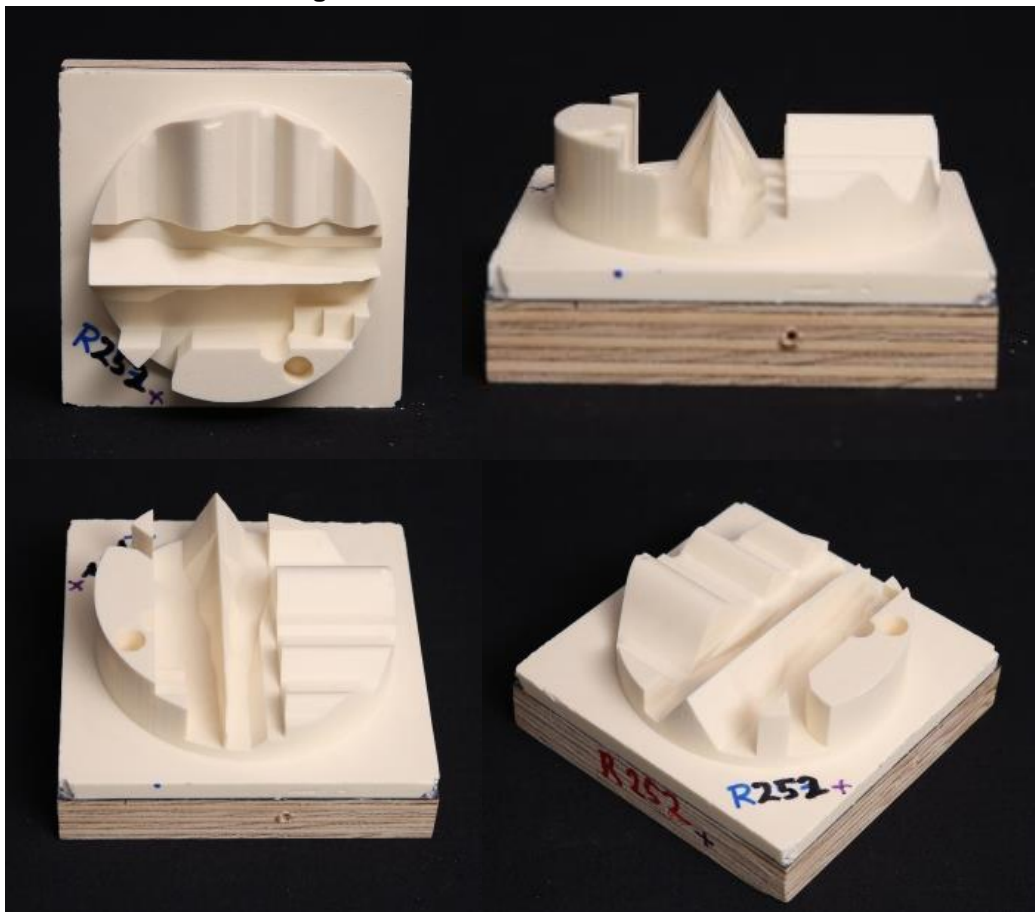


Trotz des verwendeten Trennmittels Silikon zeigte das Wachs RC253 signifikante Klebewirkung an der Schalung zur Erstellung der Wachsrohlinge. Aus dem Wachs RC253 der Firma Romonta konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden. Da ebenfalls die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass RC253 auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte.

Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm gefräst wurde, ähneln die Späne Staub, welcher sich aufgrund seiner Feinheit in der gesamten Fräse verteilt und besonders die Antriebe zugesetzt hat.

Trotzdem wird aufgrund der überwiegend guten Ergebnisse das Wachs RC253 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.

4.15. Nr.: 15 - Abkürzung: RC252



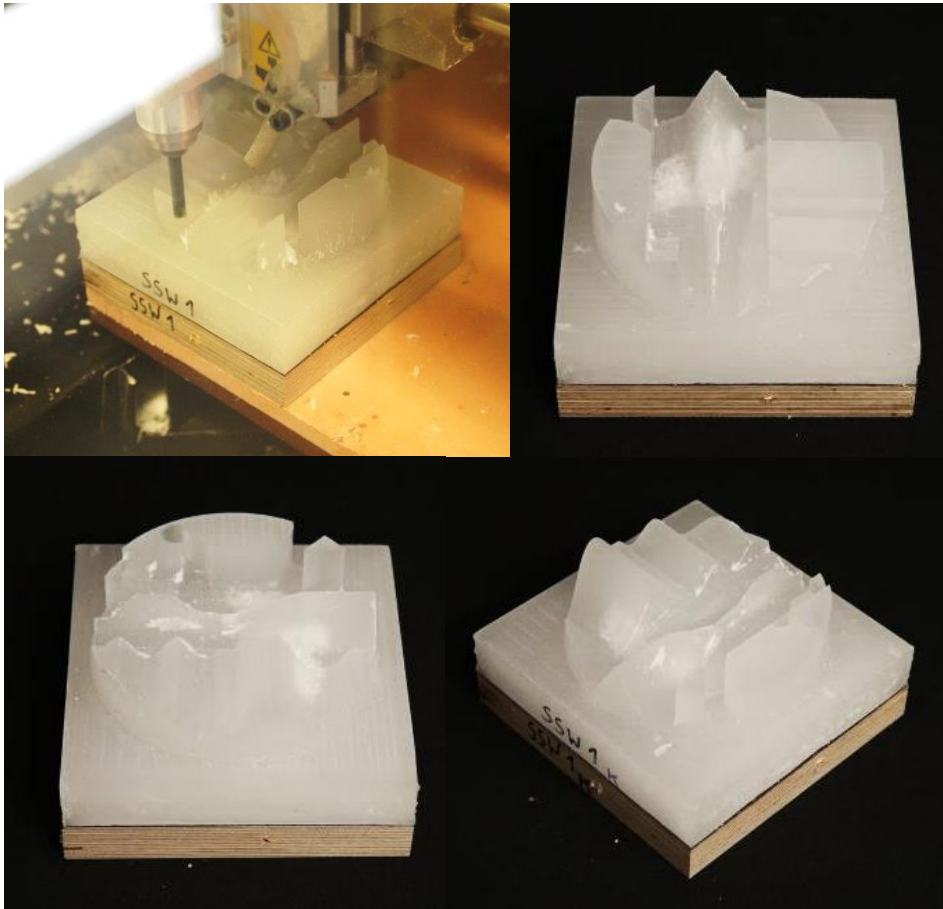
Aus dem Wachs RC252 der Firma Romonta konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden. Da ebenfalls die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass RC252 auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte.

Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm gefräst wurde, ähneln die Späne Staub, welcher sich aufgrund seiner Feinheit in der gesamten Fräse verteilt und besonders die Antriebe zugesetzt hat.

Trotzdem wird aufgrund der überwiegend guten Ergebnisse das Wachs RC252 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.



**4.16. Nr.: 16 - Abkürzung: SSW1**



Auffällig beim Sasol Wax 6403 (SSW1) ist, dass nach dem Gießen des Wachses eine sehr unregelmäßige Form mit einem mehr als 3cm tiefen Loch an der Oberseite entstanden ist. Obwohl die Referenzgeometrie komplett gefräst werden konnte, lässt sich Sasol Wax 6403 (SSW1) nur bedingt fräsen, da es besonders bei der feinen Endbearbeitung der Oberfläche zum Zusetzen bzw. zum Verkleben des Fräasers neigt. Des Weiteren haften die Späne an allen gefrästen Oberflächen und das Ablösen der haftenden Späne ist trotz des Einsatzes von Druckluft schwierig.

Aufgrund dieser Defizite wird eine das Wachs Sasol Wax 6403 (SSW1) für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft.



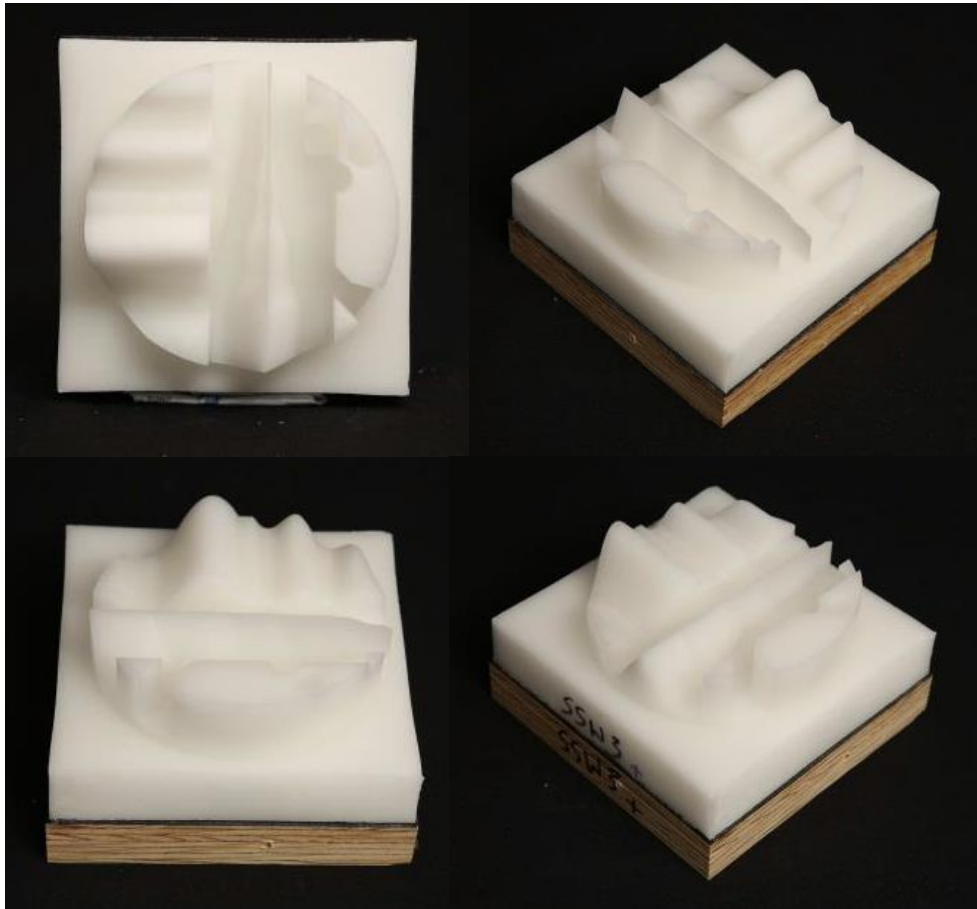
**4.17. Nr.: 17 - Abkürzung: SSW2**



Obwohl die Referenzgeometrie mehr oder weniger komplett gefräst werden konnte, lässt sich Sasol Wax 3279 (SSW2) nur bedingt fräsen, da es besonders bei der feinen Endbearbeitung der Oberfläche zum Zusetzen bzw. zum Verkleben des Fräasers neigt. Des Weiteren ist das Schnittbild des Waxes an der Oberfläche unsauber und die Späne haften an allen gefrästen Oberflächen. Das Ablösen der haftenden Späne ist trotz des Einsatzes von Druckluft sehr schwierig.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs Sasol Wax 3279 (SSW2) für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft.

**4.18. Nr.: 18 - Abkürzung: SSW3**

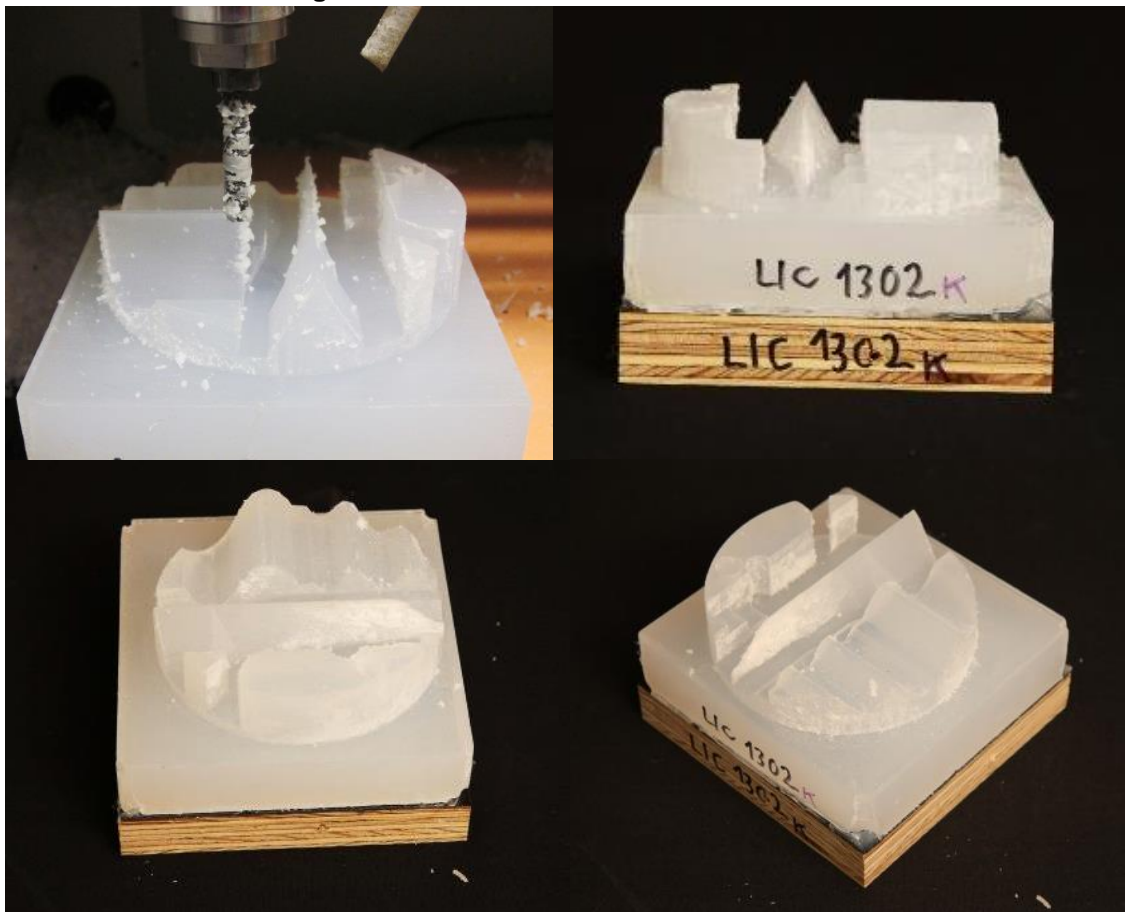


Aus dem Sasol Wax c80 (SSW3) der Firma Sasol konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden. Da ebenfalls die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass SSW3 auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte.

Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm gefräst wurde, ähneln die Späne Staub, welcher sich aufgrund seiner Feinheit in der gesamten Fräse verteilt und besonders die Antriebe zugesetzt hat.

Trotzdem wird aufgrund der überwiegend guten Ergebnisse das Wachs SSW3 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.

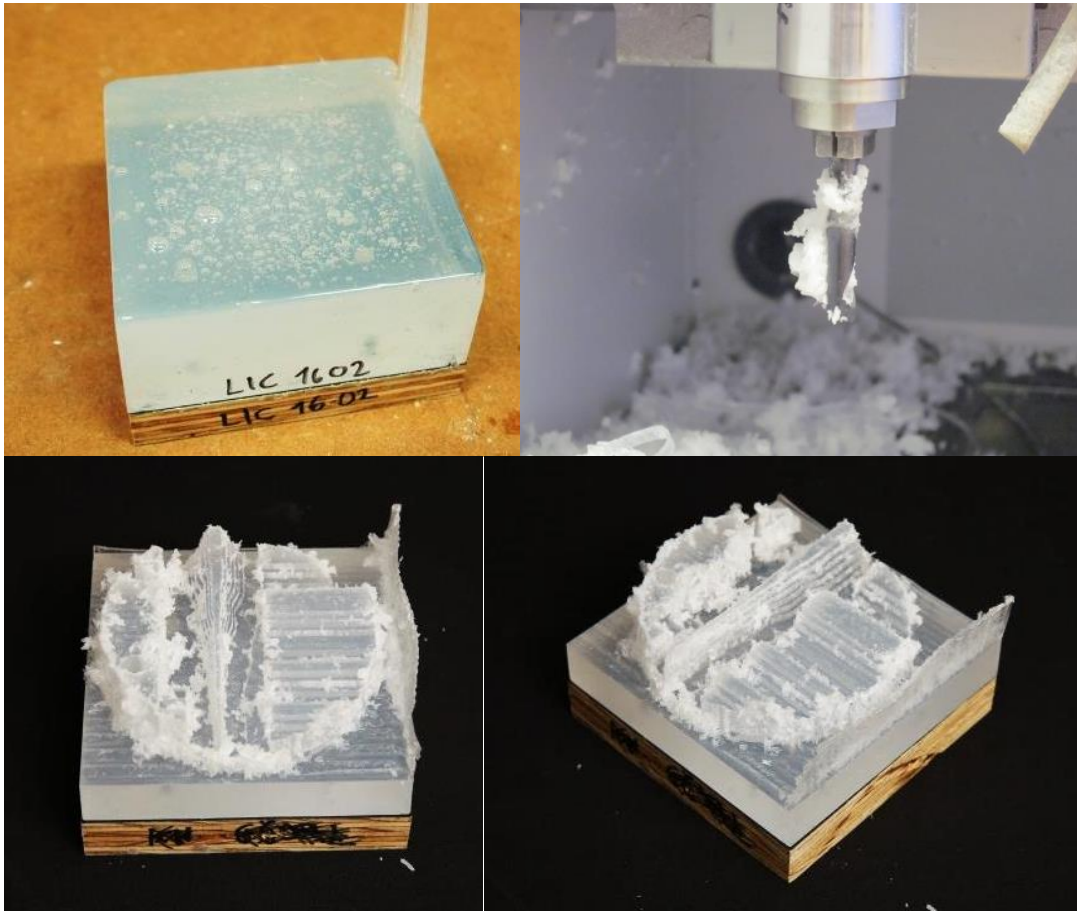
**4.19. Nr.: 19 - Abkürzung: LIC1302**



Obwohl die Referenzgeometrie komplett gefräst werden konnte, lässt sich LIC1302 nur bedingt fräsen, da es zum Zusetzen bzw. zum Verkleben des Fräasers neigt. Durch den verklebten Fräskopf kommt es zu einem sehr unsauberen Schnittbild und einer Beschädigung der Oberfläche. Zudem haften die Späne an allen gefrästen Oberflächen und das Ablösen der haftenden Späne ist trotz des Einsatzes von Druckluft sehr schwierig. Das Wachs weist haptisch die Eigenschaften von einem Kleber auf und erinnert dabei zudem eher an Gummi. Die Späne selbst sind relativ groß.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs LIC1302 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft.

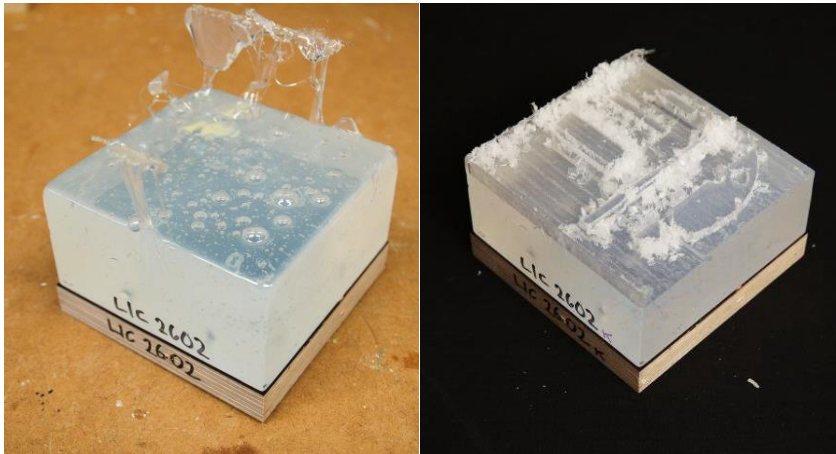
4.20. Nr.: 20 - Abkürzung: LIC1602



Obwohl die Referenzgeometrie komplett gefräst werden konnte, lässt sich LIC1602 nur bedingt fräsen, da es zum Zusetzen bzw. zum Verkleben des Fräasers neigt. Durch den verklebten Fräskopf kommt es zu einem sehr unsauberen Schnittbild und einer Beschädigung der Oberfläche. Zudem haften die Späne an allen gefrästen Oberflächen und das Ablösen der haftenden Späne ist trotz des Einsatzes von Druckluft sehr schwierig. Das Wachs weist haptisch die Eigenschaften von einem Kleber auf und erinnert dabei zudem eher an Gummi. Es ist nicht spröde, sondern lässt sich bei Zimmertemperatur verbiegen und bildet Fäden. Die Späne selbst sind relativ groß.

Aufgrund dieser Defizite wird dass Wachs LIC1602 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft.

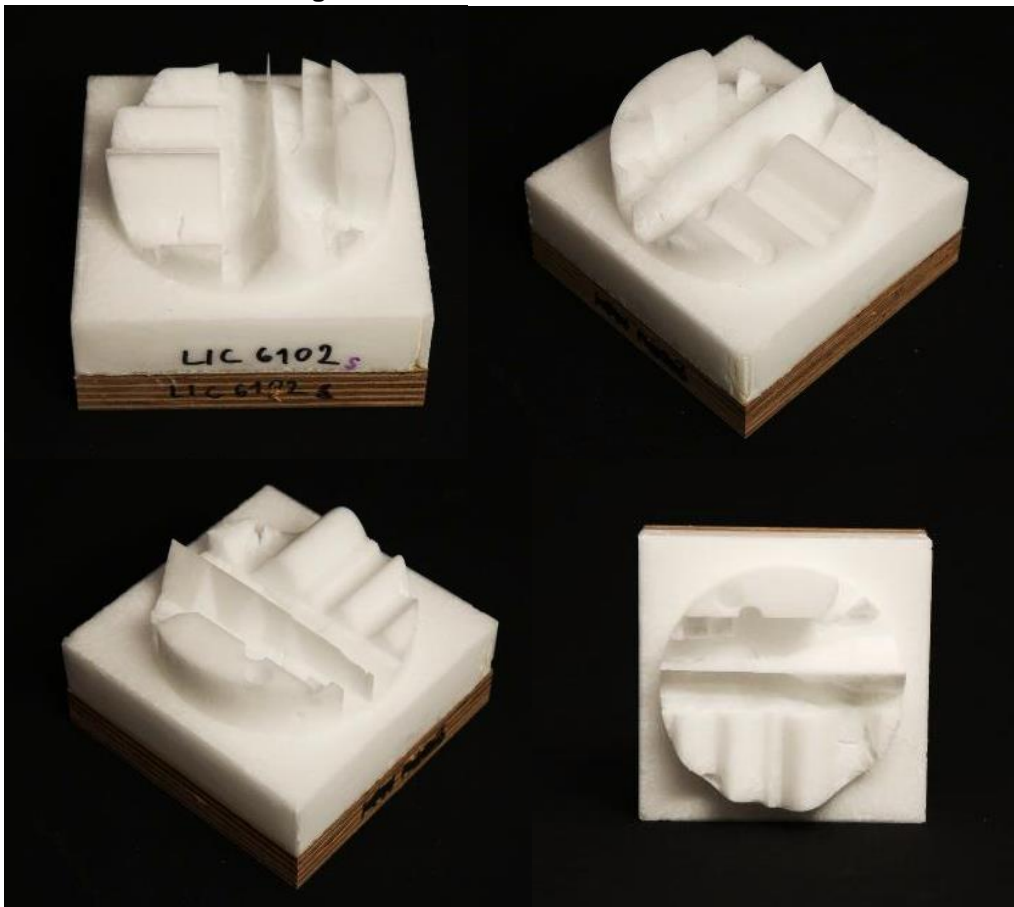
4.21. Nr.: 21 - Abkürzung: LIC2602



Der Fräsvorgang bei dem Wachs LIC2602 musste abgebrochen werden, da die Späne an der Oberfläche haften blieben und der Fräskopf verklebte. Das Wachs weist haptisch die Eigenschaften von einem Kleber auf und erinnert dabei zudem eher an Gummi. Es ist nicht spröde, sondern lässt sich bei Zimmertemperatur verbiegen und bildet Fäden. Die Späne selbst sind relativ groß.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs LIC2602 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft.

4.22. Nr.: 22 - Abkürzung: LIC6102



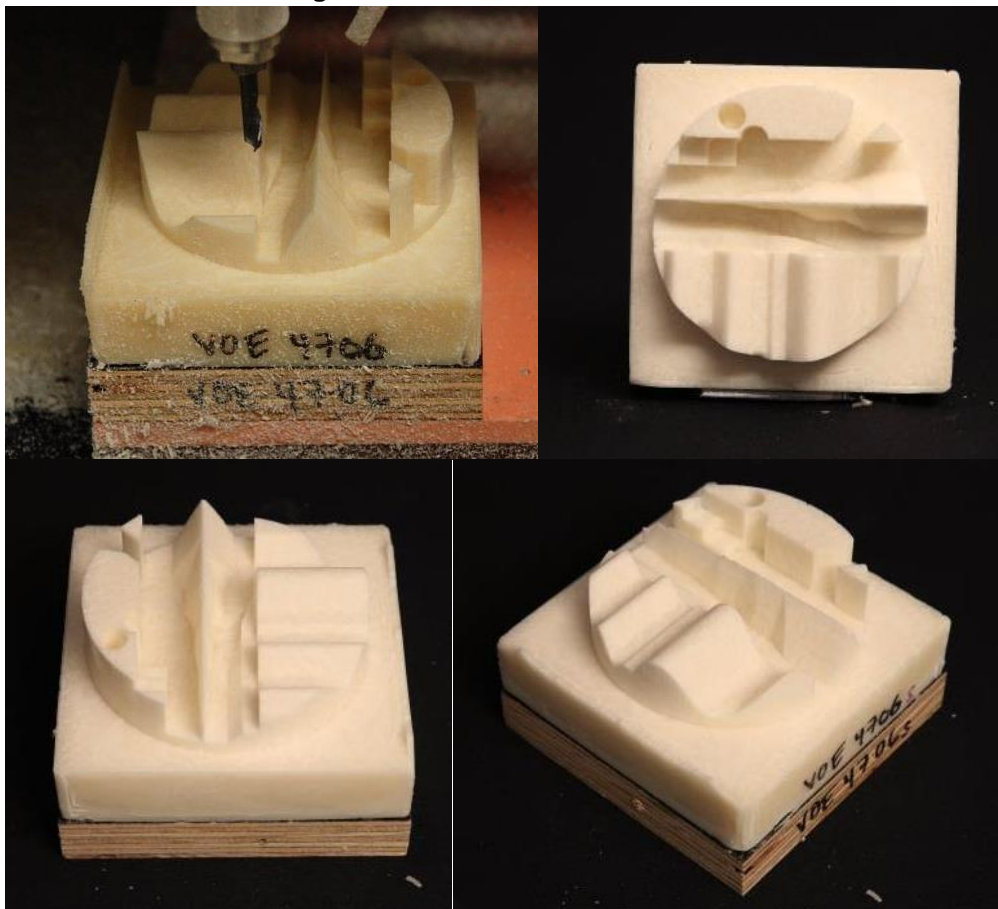


Aus dem Wachs LIC6102 der Firma Clariant konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden, wobei sich das Wachs ohne Zusetzen bzw. Verkleben des Fräasers bearbeiten ließ. Ebenfalls konnten keine Anhaftungen von Wachspänen an den Oberflächen der Referenzgeometrie festgestellt werden. Schwächen weist das Wachs bei der Herstellung des scharfen Grats auf. Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Die Späne ähneln Staub, obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm Tiefe gefräst wurde.

Nachteilig bei diesem Wachs scheint seine hohe Sprödeheit zu sein, die zu einem leichten Abbrechen filigraner geometrischer Elemente führt. Zudem zeigt das Wachs nach dem Gießen Risse, welche das Abbrechen einzelner gefräster Elemente begünstigen und zu einer Oberflächenbeeinträchtigung führen.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs LIC6102 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu spröde“** eingestuft.

### 4.23. Nr.: 23 - Abkürzung: VOE4706



Aus dem Wachs VOE4706 der Firma Völpker konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden, wobei sich das Wachs ohne Zusetzen bzw. Verkleben des Fräasers bearbeiten ließ. Leichte Anhaftungen von Wachspänen konnten an den Oberflächen der Referenzgeometrie festgestellt werden. Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Die Späne ähneln Staub, obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm Tiefe gefräst wurde.

Nachteilig bei diesem Wachs scheint seine hohe Sprödeheit zu sein, die zu einem leichten Abbrechen filigraner geometrischer Elemente führt. Zudem zeigt das Wachs nach dem Gießen Risse, welche das Abbrechen einzelner gefräster Elemente begünstigen und zu einer Oberflächenbeeinträchtigung führen.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs VOE4706 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu spröde“** eingestuft.

4.24. Nr.: 24 - Abkürzung: VOE6628

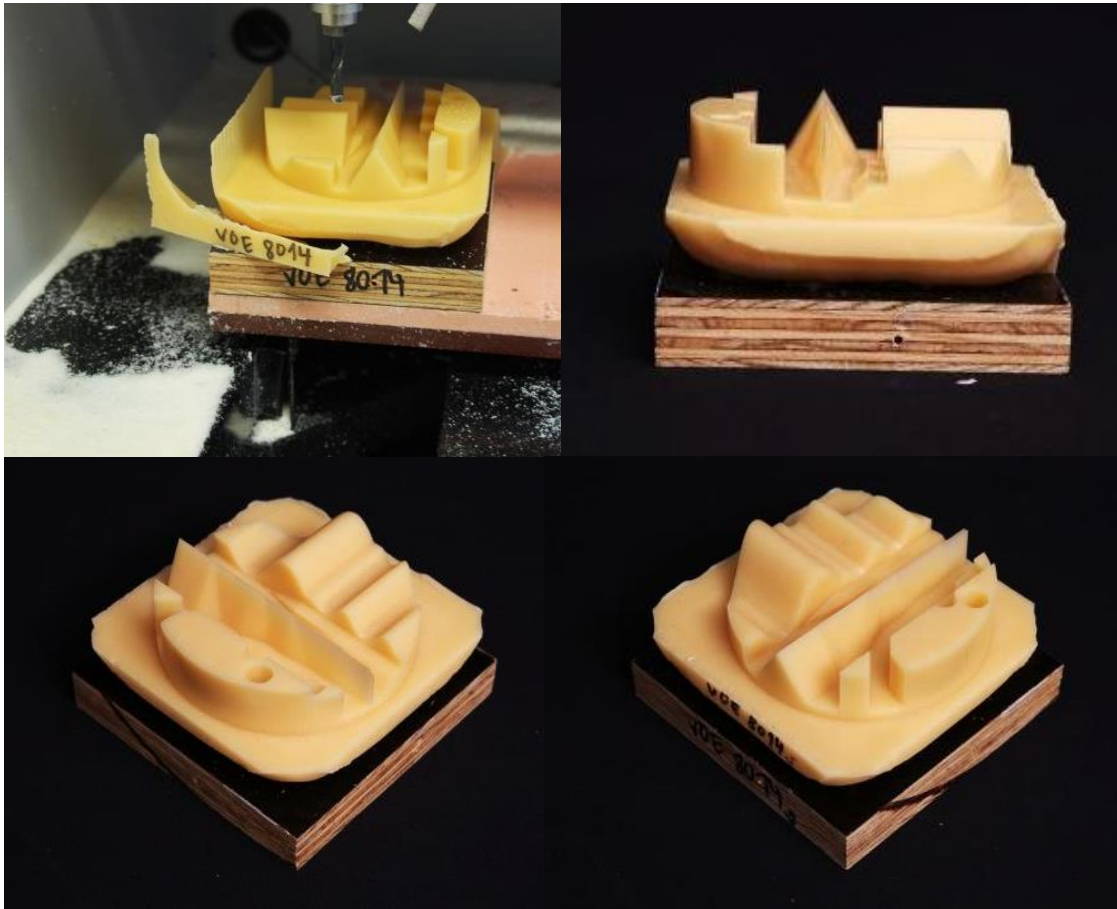


Schon bei der Herstellung eines Wachsblockes zeigt das Wachs VOE6628 der Firma Völpker beim Erhärten des flüssigen Waxes durch Oberflächenrisse und Schrumpf sein sehr sprödes Verhalten. Aus dem VOE6628 konnte aber die Referenzgeometrie theoretisch gefräst werden, wobei sich das Wachs ohne Zusetzen bzw. Verkleben des Fräasers bearbeiten ließ. Ebenfalls konnten keine Anhaftungen von Wachspänen an den Oberflächen der Referenzgeometrie festgestellt werden.

Nachteilig bei diesem Wachs scheint seine hohe Sprödeheit zu sein, die zu einem leichten Abbrechen filigraner geometrischer Elemente führt. Zudem zeigt das Wachs nach dem Gießen relativ große Risse und Hohlräume, welche das Abbrechen einzelner gefräster Elemente begünstigen und zu einer Oberflächenbeeinträchtigung führen.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs VOE6628 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu spröde“** eingestuft.

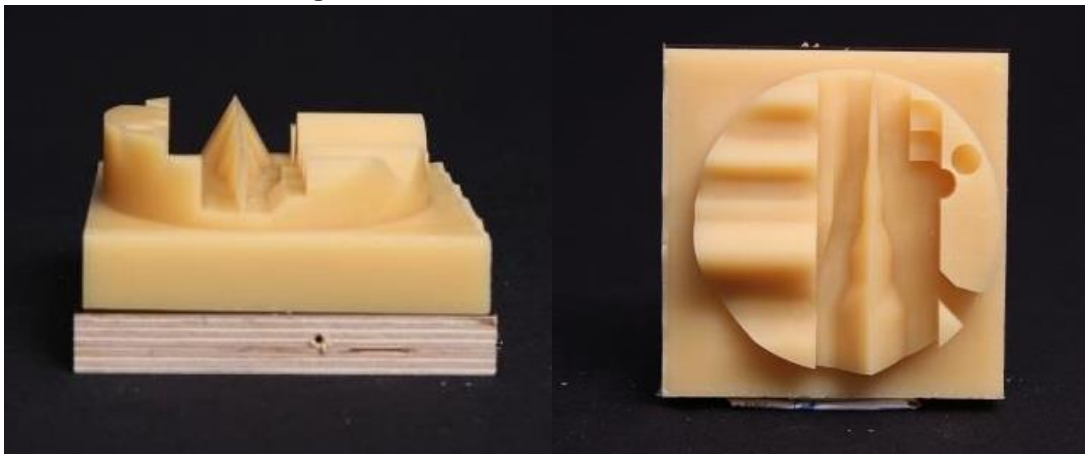
4.25. Nr.: 25 - Abkürzung: VOE8014



Aus dem Wachs VOE8014 der Firma Völpker konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden, wobei sich das Wachs ohne Zusetzen bzw. Verkleben des Fräasers bearbeiten ließ. Allerdings scheint das Wachs auch sehr spröde zu sein und platzte während des Fräsens an den Ecken stark ab. Die Späne ähneln Staub, obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm Tiefe gefräst wurde.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs VOE8014 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu spröde“** eingestuft.

4.26. Nr.: 26 - Abkürzung: VOE6548-V2







Aus dem Wachs VOE6548V2 der Firma Völpker konnte die Referenzgeometrie komplett gefräst werden. Da ebenfalls die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass VOE6548V2 auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte.

Auffällig ist das Spanverhalten des Materials. Obwohl mit einer Schnittmenge von 5 mm gefräst wurde, ähneln die Späne Staub, welcher sich aufgrund seiner Feinheit in der gesamten Fräse verteilt und besonders die Antriebe zugesetzt hat.

Trotzdem wird aufgrund der überwiegend guten Ergebnisse das Wachs VOE6548V2 für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.

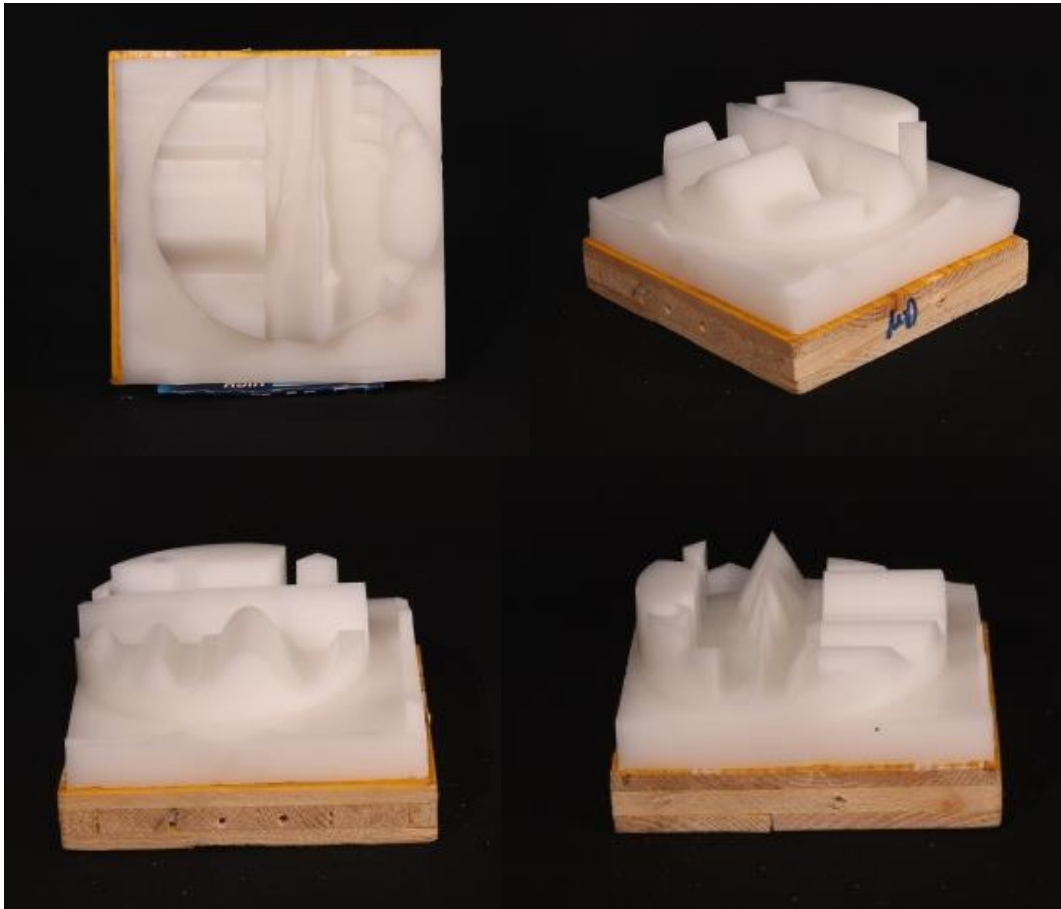
#### 4.27. Nr.: 27 - Abkürzung: MACO



Das Wachs MACO der Firma Paramelt, welches ebenfalls im Forschungsprojekt „Zero Waste Free-form Formwork“ von Gramazio/Kohler an der ETH Zürich eingesetzt wurde, kann nicht mit den hier verwendeten rotierenden Fräswerkzeugen geschnitten bzw. in Form gebracht werden. Der Fräsvorgang bei dem Wachs MACO musste abgebrochen werden, da die Späne an der Oberfläche haften blieben und der Fräskopf verklebte.

Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs MACO für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft

**4.28. Nr.: 27 - Abkürzung: MORFr**



Das zur Verfügung gestellte Fräswachs Wax eco fräswachs (MORFr) der Firma Morsa aus dem Bereich der Dentaltechnik eignet sich erwartungsgemäß sehr gut für das CNC gesteuerte Herstellen hochpräziser Schalungen. Es können keine gravierenden Mängel oder Schäden an der Oberfläche oder mangelhaftes Spanverhalten festgestellt werden. Mit den angegebenen Einstellungen können sämtliche Geometrien gefräst werden. Da die Oberflächen sehr eben und glatt gefräst wurden, kann davon ausgegangen werden, dass MORFr auch für größere Schalungselemente eingesetzt werden könnte.

Aufgrund der überwiegend guten Ergebnisse wird das Wachs MORFr für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen und als **prinzipiell „geeignet“** eingestuft.



**4.29. Nr.: 29 - Abkürzung: SH**



Das Wachs SH kann nicht mit den hier verwendeten rotierenden Fräswerkzeugen geschnitten bzw. in Form gebracht werden. Der Fräsvorgang bei dem Wachs SH musste abgebrochen werden, da die Späne an der Oberfläche haften blieben und der Fräskopf verklebte.

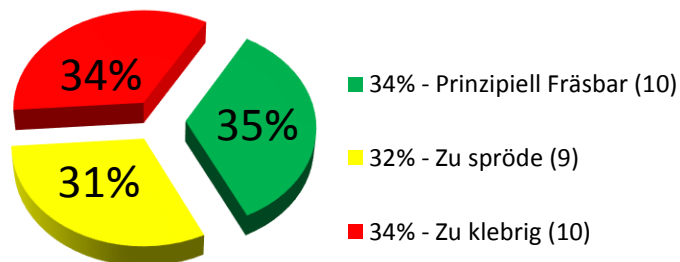
Aufgrund dieser Defizite wird das Wachs SH für die Verwendung als Material für ein effizientes Herstellen hochpräziser Schalungen für Betonkörper nicht in Betracht gezogen und als **prinzipiell „zu klebrig“** eingestuft

## 5. Zusammenfassende Auswertung und Resümee

**Tabelle 2: Übersicht der hinsichtlich ihrer Fräsbarkeit untersuchten Wachse, welche durch Wachshersteller zur Verfügung gestellt wurden, unter Angabe der generellen Fräseignung**

Nr.:	Wachshersteller	Wachsbezeichnung	Abkürzung	TP Tropf- punkt [°C]	EP Erstar- rungspunkt/ - bereich [°C]	N-PEN bei 25°C [1/10 mm]	Generell fräsgeeignet
1	H&R Wasag AG 20457 Hamburg	H&R Wax 64/66	HR64-66	k. A.	ca. 65	19	zu klebrig
2		H&R Wax 60/62 321	HR60-62	k. A.	ca. 61	15	zu klebrig
3		H&R Wicrofin 74	HR-Wic	k. A.	ca. 72	20	zu klebrig
4	Kahl GmbH & Co. KG 22946 Trittau	Kahlwax® 2811	KW2811	79	k. A.	k. A.	zu spröde
5		Kahlwax® 4180	KW4180	112	k. A.	k. A.	zu spröde
6		Kahlwax® 5023	KW5023	83	79	k. A.	zu spröde
7		Kahlwax® 6607L	KW6607L	75	k. A.	k. A.	zu spröde
8	Wachs- & Ceresin- Fabriken Th. C. Tromm GmbH 50735 Köln	ConFormWax®	CFW	73 - 79	62 - 66	3 - 5	geeignet
9		POLARWACHS® 30 839	PW	110 - 121	k. A.	ca. 1	zu spröde
10		POLYCERIT® N 174	PC	117 - 122	k. A.	k. A.	geeignet
11	ROMONTA GmbH 06317 Arnsdorf	PW 3119	PW3119	97	k. A.	4,1	geeignet
12		PW 3139	PW3139	110	k. A.	3,6	geeignet
13		PW 3146	PW3146	98	k. A.	2,5	geeignet
14		Romocast 253	RC253	76	k. A.	2,5	geeignet
15		Romocast 252	RC252	80	k. A.	2,0	geeignet
16	Sasol Wax GmbH 20457 Hamburg	Sasol Wax® 6403	SSW1	k. A.	63 - 66	16 - 20	zu klebrig
17		Sasol Wax® 3279	SSW2	80 - 86	76 - 82	14 - 18	zu klebrig
18		Sasol Wax® c80	SSW3	k. A.	78 - 83	0 - 7	geeignet
19	CLARIANT Wax über Ter Hell & Co. GmbH 20457 Hamburg	Licocene® PP 1302 Gr	LIC1302	ca. 90	k. A.	k. A.	zu klebrig
20		Licocene® PP 1602 Gr	LIC1602	ca. 88	k. A.	k. A.	zu klebrig
21		Licocene® PP 2602 Gr	LIC2602	ca. 99	k. A.	k. A.	zu klebrig
22		Licocene® PP 6102 Gr	LIC6102	ca. 145	k. A.	k. A.	zu spröde
23	Völpker Spezialprodukte GmbH 39393 Völpke	Völpker® 4706	VOE4706	73 - 78	ca. 50	k. A.	zu spröde
24		Völpker® 6628	VOE6628	65 - 75	57 - 63	k. A.	zu spröde
25		Völpker®8014	VOE8014	70 - 80	65 - 70	< 10	zu spröde
26		Völpker ®6548 V2	VOE6548- V2	k. A.	102,6	k. A.	geeignet
27	Paramelt, Sales office Germany 20457 Hamburg	MACO (EU)	MACO	66 - 76	ca. 60	ca. 10	zu klebrig
28	MORSA Wachsf. Sallinger GmbH 86831 Krumbach	Wax eco Fräswachs	MORFr	80 - 130	k. A.	k. A.	geeignet
29	Steinhard Wachswerke 86381 Krumbach	Steinhard 60 rot	SH	k. A.	ca. 60	k. A.	zu klebrig

Die 29 durchgeführten Versuche zur Überprüfung der Fräsbarkeit von unterschiedlichen Wachsen anhand einer Referenzgeometrie haben ergeben, dass sich die untersuchten Wachse hinsichtlich ihrer Fräsbarkeit generell in geeignet (also fräsbar), zu spröde oder zu klebrig einteilen lassen.



**Bild 5.1: Ergebnis der untersuchten Wachse hinsichtlich ihrer generellen Fräsbarkeit in: geeignet, zu spröde oder zu klebrig**

Wie in Bild 5.1 dargestellt, wurden 10 der untersuchten Wachse als „zu klebrig“ für die Fräsbearbeitung und somit als ungeeignet für die Anwendung als Schalungsmaterial eingestuft. Ein sauberes Schneiden dieser Wachse mit einem Fräser und die Entstehung von Frässpänen, die abgeführt werden konnten, war dabei nicht möglich, und es kam vornehmlich zu einem Zusetzen des Fräswerkzeuges und zu einer Anhaftung von Wachsresten an der bereits gefrästen Oberfläche. Wenn man die Eigenschaften dieser Wachse betrachtet wird deutlich, dass dieses Phänomen nicht von der Tropfpunkt (TP) - bzw. Erstarrungspunkttemperatur (EP), sondern stark von der Weichheit bzw. Nadelpenetrationshärte der Wachse abhängt. Eine Nadelpenetrationshärte über 10 [1/10 mm] impliziert somit, wie vorab angenommen, eine schlechte Fräsbarkeit bzw. eine zu hohe Klebrigkeit der Wachse.

Weitere 9 der untersuchten Wachse wurden als „zu spröde“ für die Fräsbearbeitung und somit als ungeeignet für die Anwendung als Schalungsmaterial eingestuft. Zwar ließen sich diese Wachse ohne ein Zusetzen bzw. Verkleben des Fräasers bearbeiten, viele Wachse zeigten aber bereits nach dem Gießen des Rohlings unterschiedlich starke thermisch bedingte Fehlstellen z.B. Risse, und Hohlräume. Diese Fehlstellen begünstigten den starken Hang dieser Wachse zu einem leichten Auseinander- oder Abbrechen unterschiedlicher gefräster Elemente und Kanten. Zudem führen sie zu einer unzureichenden Oberflächenqualität da z.B. sich die Risse sich an der Oberfläche des Betons Abzeichnen und zu einem ausbluten des Betons führen könnten. Obwohl dies nicht eindeutig quantifizierbar ist, scheint eine zu hohe Härte des Wachses (N-PEN unter [1/10 mm]) zu einem zu spröde Verhalten zu führen und ein Indikator für eine ungünstige generelle Fräsbarkeit zu sein.

Die 10 der auf Basis der „vereinfachten“ Anforderungen ausgewählten und von verschiedenen Wachsherstellern zur Verfügung gestellten Wachse, welche als prinzipiell Fräsbar eingestuft wurden, zeigen, dass Wachs als Material für ein effizientes Herstellen CNC gefräster hochpräziser freigeformter Schalungen für Betonkörper in Betracht gezogen werden kann. Weder kam es bei diesen 10 Wachsen zu einem Zusetzen des Fräasers, noch zu einer Störung der Struktur durch Fehlstellen. Bei all diesen Wachsen konnte die komplexe Referenzgeometrie komplett mit einer jeweils zufriedenstellenden Oberflächenqualität gefräst werden. Alle geometrischen Elemente, wie die amorphe parabelförmige unidirektional gekrümmte Fläche, die Stufen, die Zylinderbohrungen, die Dreieckszylinder und der zulaufende scharfe Grat (bis auf die erwarteten Einschränkungen an der Spitze des kleinsten 5° Winkel) konnten selbst mit scharfen Kanten detailgetreu abgebildet werden.

Zusammenfassend haben die Versuche gezeigt, dass sich Wachse stark in ihrer Fräsbarkeit unterscheiden und dass die Härte eines Wachses maßgebend für seine Fräsbarkeit verantwortlich zu sein scheint. Eine zu große Härte führt dabei anscheinend zu einer starken Anfälligkeit für ungewollte Sprödebrüche und somit zu einer verminderten Robustheit. Eine zu niedrige Härte bewirkt das Zusetzen des Fräasers und eine Anhaftung der Späne an den gefrästen Oberflächen.

Für eine umfassendere Beurteilung der Wachse hinsichtlich ihrer Eignung als Schalungsmaterial sollten auf Basis dieser Vorauswahl weiterführende Versuche zu den physikalisch-technischen Eigenschaften durchgeführt werden. Auf Basis dieser ermittelten Eigenschaften könnte die Beurteilungsgrundlage deutlich verbessert bzw. verfeinert werden um so ein optimal geeignetes wachs als Schalungsmaterial für freigeformte Betonbauteile auswählen zu können.

Anhang D: Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) von Wachsen

## Versuchsprotokoll:

Titel:	Dynamische Differenzkalorimetrie DSC von Wachsen
Thema:	Non Waste Wachsschalungen DFG
Versuchsnummer:	ITE_150303
Datum:	07.04.2015
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Jeldrik Mainka

### 1 Ziel des Versuchs / Erwartete Ergebnisse:

Ziel der Versuche ist es, mit den kalorimetrischen Messungen die thermischen Eigenschaften der Wachse bezüglich der abgegebenen oder aufgenommenen Wärmemenge bei Aufheizung und Abkühlung zu ermitteln und hieraus die veränderliche spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur zu bestimmen. Relevante endotherme Prozesse sind dabei der Glasübergang und das Schmelzen, exothermer Prozess ist die Kristallisation. Durch die Analyse des Verlaufes der spezifischen Wärmekapazität über die Temperatur können bestimmte für jedes Material charakteristische Temperaturen abgelesen bzw. ermittelt werden.

### 2 Materialien und Grundlagen

#### 2.1 Wachse

Tabelle 1: Wachsauswahl für die Untersuchung

Hersteller	Bezeichnung/ Abkürzung	Erstarrungspunkt / -bereich EP/ Tropfpunkt / -bereich TP
Tromm GmbH	CFW	EP 62-66°C / TP 73-79°C
Tromm GmbH	PC	TP 117 – 122 °C
ROMONTA GmbH	PW 3119	TP 97 °C
ROMONTA GmbH	PW 3139	TP 110,4 °C
ROMONTA GmbH	PW 3146 * <sup>1</sup>	TP 98,1°C
ROMONTA GmbH	RC 252 * <sup>1</sup>	TP 80,1 °C
ROMONTA GmbH	RC253 * <sup>2</sup>	TP 76,3 °C
Sasol Wax GmbH	SSW 3	EP 78 – 83 °C
Völpker Spezialprodukte GmbH	VOE6548	TP 102,6
MORSA Wachsf.	MORFr	TP 80 – 130 °C
* Wachs ist mit Terephthalsäure als Füllstoff versetzt: * <sup>1</sup> 40 Gew.-% / * <sup>2</sup> 25 Gew.-%		

## 2.2. Dynamisches Differenzkalorimeter

Für die Untersuchung der ausgewählten 10 Wachse wurde das Dynamische Differenzkalorimeter (englisch differential scanning calorimetry DSC) Typ Netzsch DSC 204 des Instituts für Technische Chemie (ITC), Abt. Makromolekulare Stoffe der Technischen Universität Braunschweig von Prof. Dr. Henning Menzel mit dessen freundlicher Unterstützung verwendet.

Bei der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) handelt es sich um ein relativ standardisiertes Verfahren der thermischen Analyse zur Messung von abgegebener oder aufgenommener Wärmemenge einer Probe bei Aufheizung, Abkühlung oder einem isothermen Prozess. Die kalorimetrischen Untersuchungen basieren dabei auf der grundlegenden kalorimetrischen Gleichung (hier: konstanter Druck):

$$\Delta Q = C_p \times \Delta T \quad (2)$$

und erlauben die Bestimmung einer ausgetauschten Wärmemenge  $\Delta Q$  [J/kg] und der spezifischen Wärmekapazität  $C_p$  [J/(kg·K)] eines Systems bei der Kenntnis der jeweils anderen Größe und der Messung von  $\Delta T$  [K].

## 3 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Proben wurden gewogen, in kleine Aluminiumcontainer gepresst und in das Gerät eingelegt. Bei den Untersuchungen wurde als Referenz Aluminiumoxid eingesetzt, als Atmosphäre wurde Argon und als Kühlmittel Stickstoff verwendet. Basierend auf den Empfehlungen des ITC wurden 10 mg Wachsproben im DSC von -10°C bis auf 150° mit einer Heizrate von 10 K/min aufgeheizt und mit einer Abkühlrate von 20 K/min wieder abgekühlt. Für alle Wachse wurden nahezu identische Einwaagen verwendet (10 mg), um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit und zum Ausschluss der „thermischen Vorgeschichte“ wurden alle Proben jeweils zweifach aufgeheizt und abgekühlt. Für die Auswertung wurde die jeweils zweite Messung verwendet.

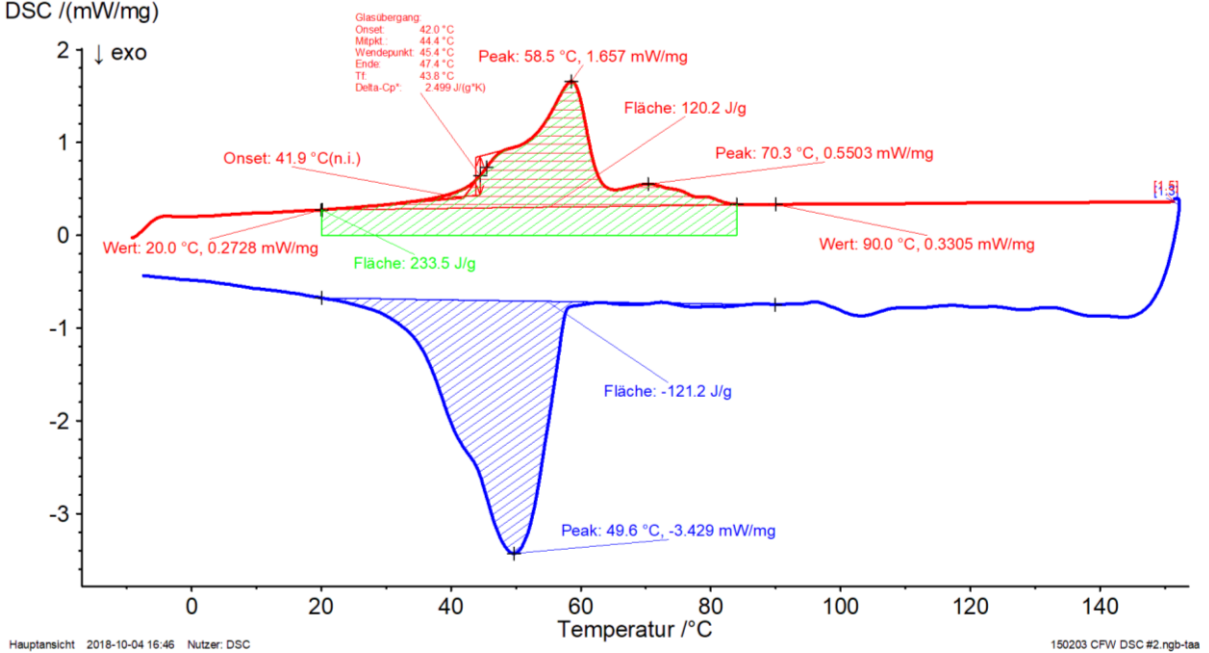
## 4 Ergebnisbeschreibung

Die am ITC mittels DCS ermittelten Messkurven der veränderlichen spezifischen Wärmekapazität (DSC in mW/mg) über die Temperatur (K) für die 10 untersuchten Wachse sind im Folgenden dargestellt. Mit Unterstützung der Mitarbeiter des ITC wurden die Verläufe der Messkurven hinsichtlich charakteristischer Temperaturen analysiert und relevante Hilfsggeraden erstellt. Mittels dieser Hilfsggeraden (Wendetangenten und die extrapolierten Ausgleichsgeraden der Anfangs- bzw. Endbasislinien) konnten so der DSC Schmelzpeak, der DSC Onsetwert und die Fläche zur Integration der DSC Schmelzenergien bestimmt und jeweils in die Messkurven eingezeichnet werden. Im nachfolgend sind die Ergebnisse der Messungen je Wachs dargestellt:



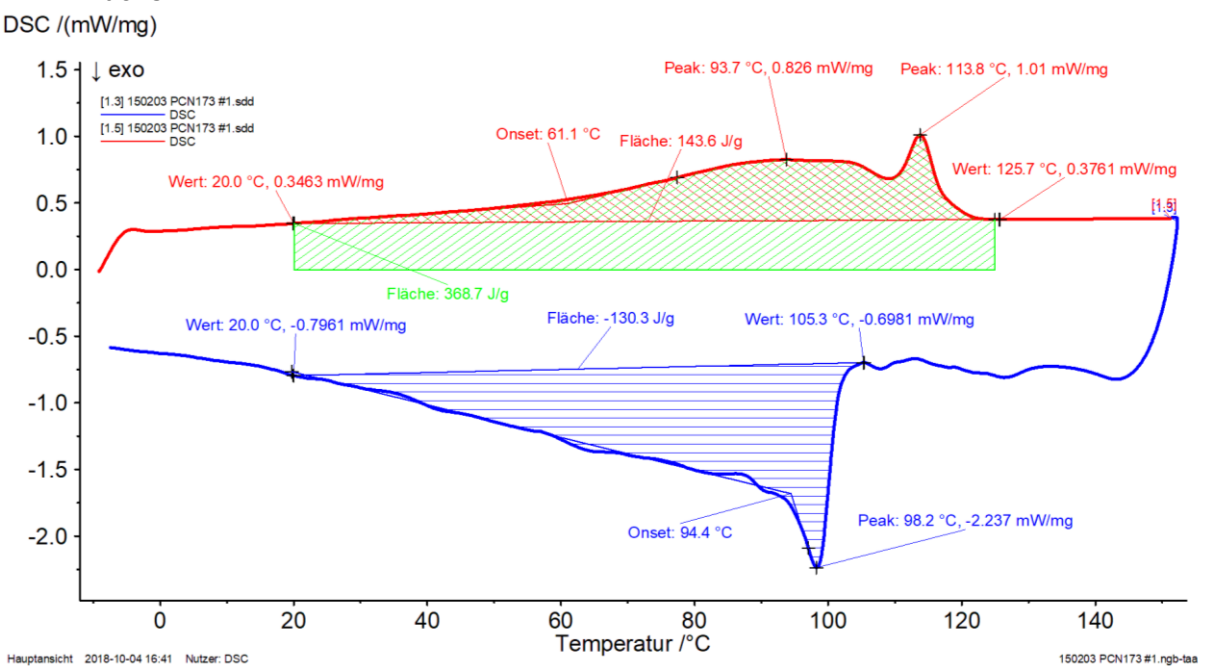
#### 4.1 Wachs: CFW

DSC /(mW/mg)



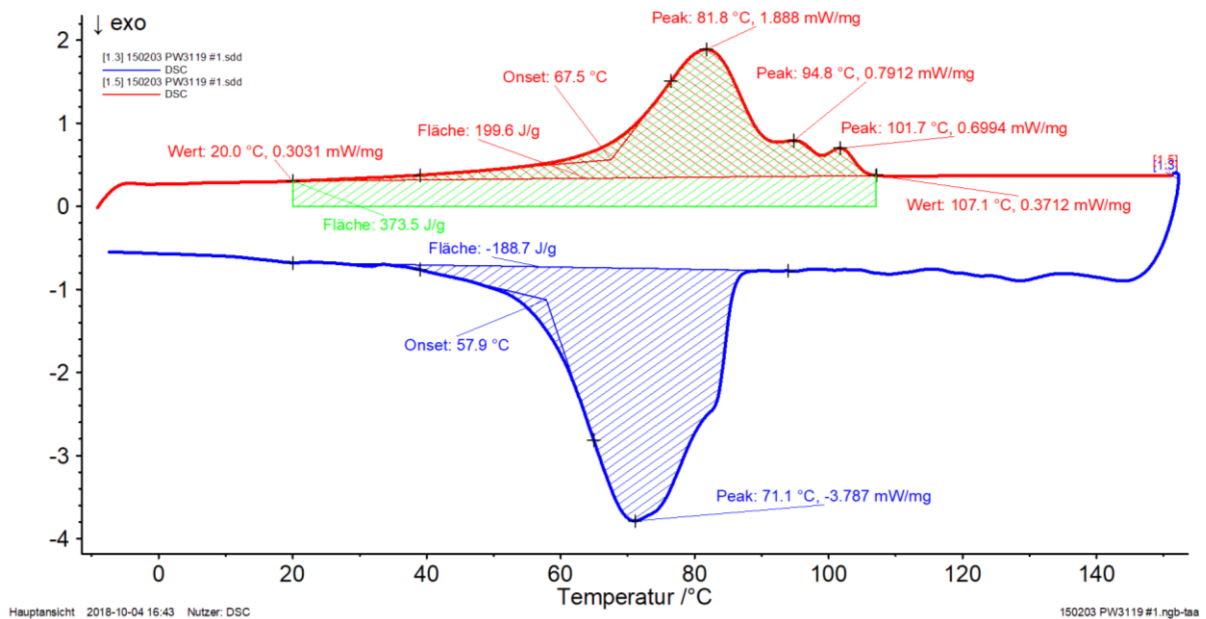
#### 4.2 Wachs: PC

DSC /(mW/mg)



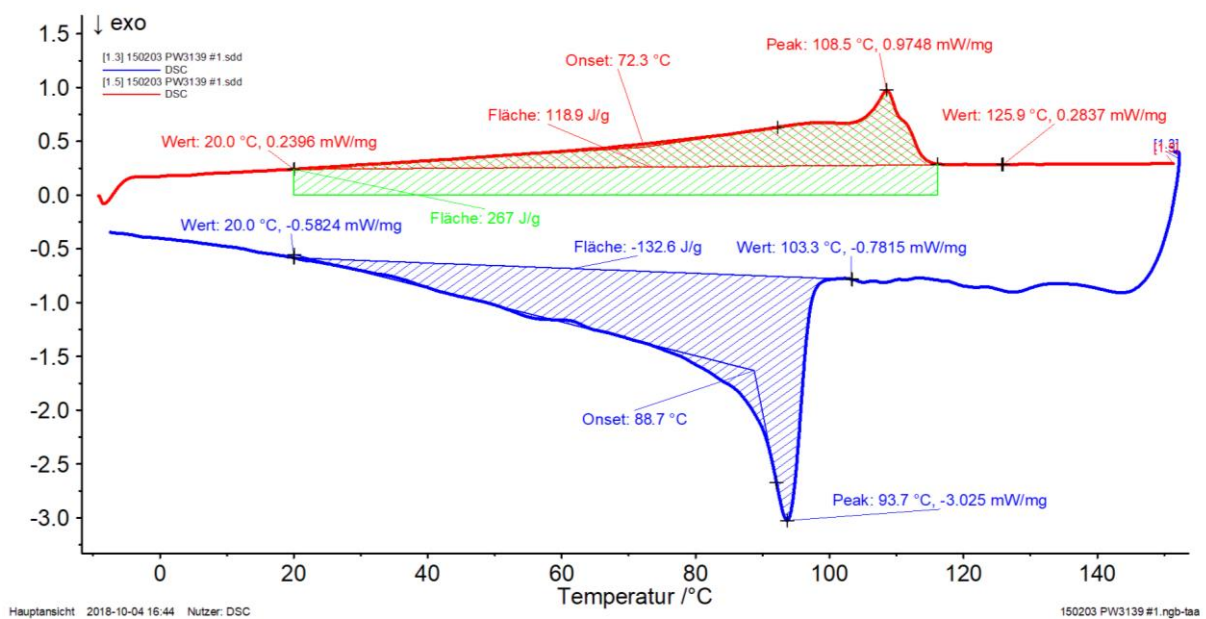
#### 4.3 Wachs: PW 3119

DSC /(mW/mg)



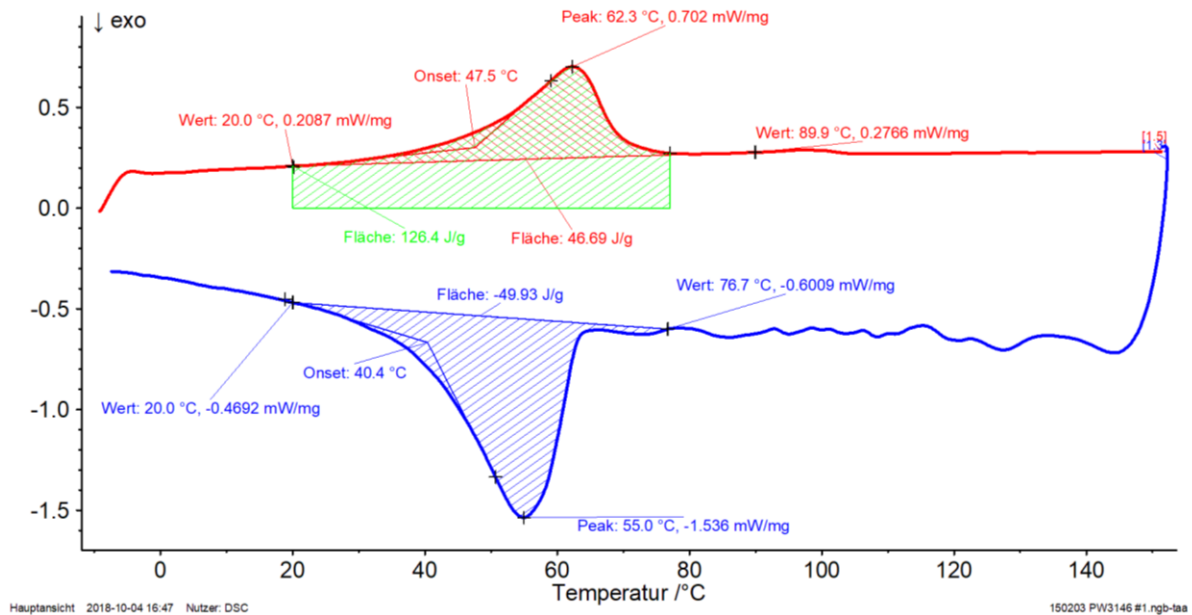
#### 4.4 Wachs: PW 3139

DSC /(mW/mg)



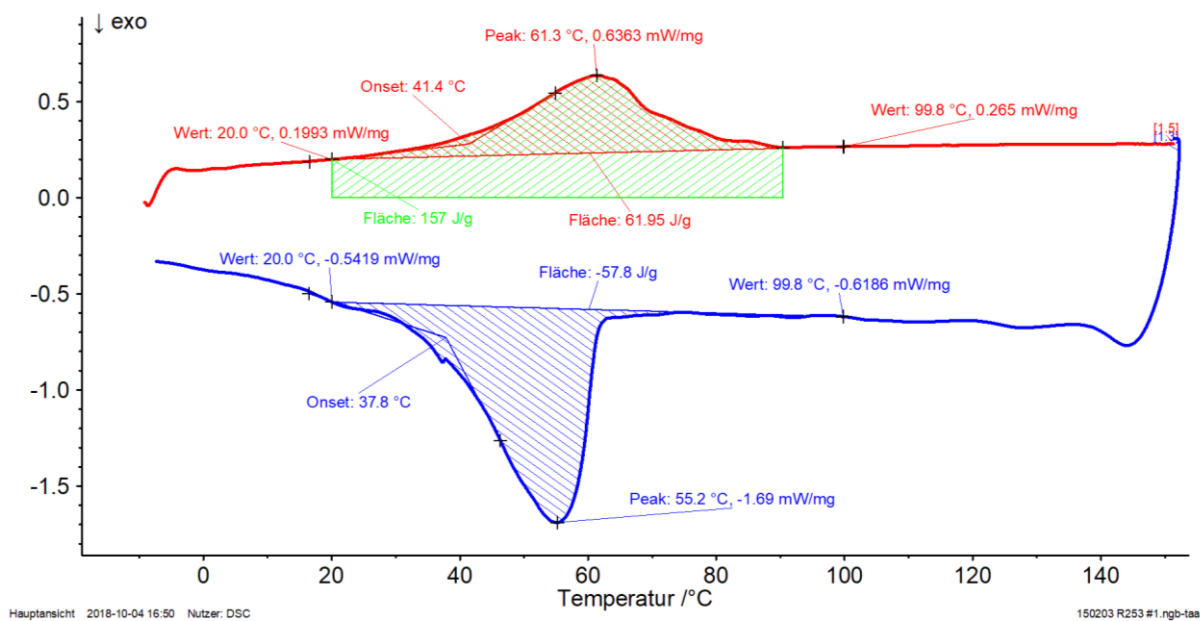
#### 4.5 Wachs: PW 3146

DSC /(mW/mg)



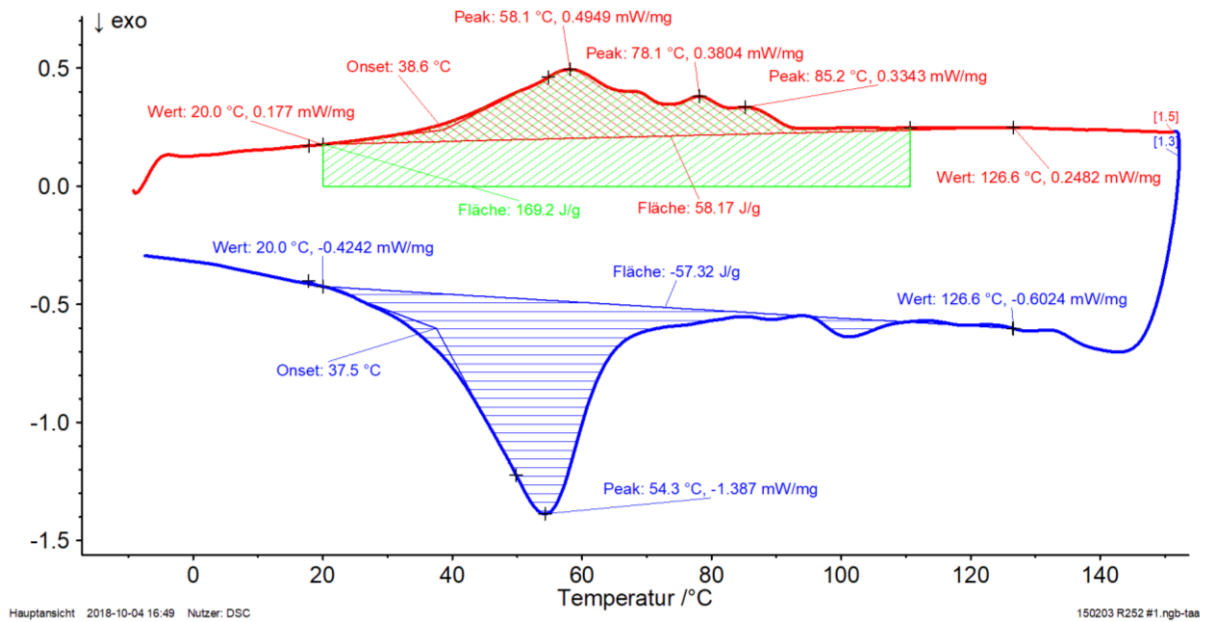
#### 4.6 Wachs: RC253

DSC /(mW/mg)



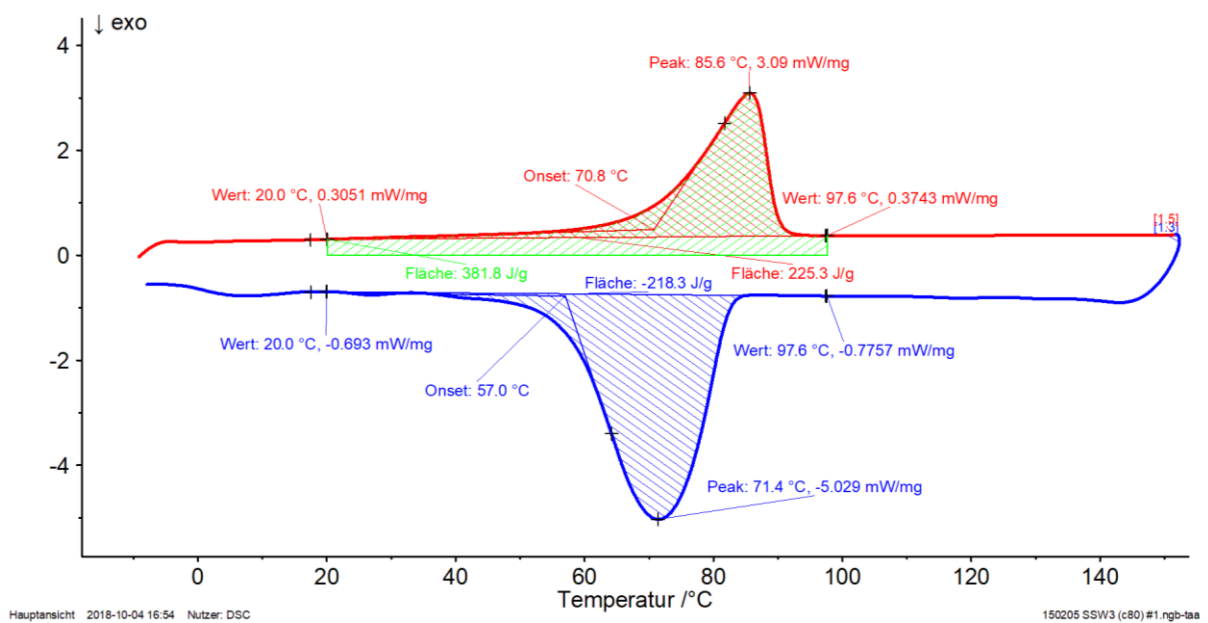
#### 4.7 Wachs: RC 252

DSC /(mW/mg)



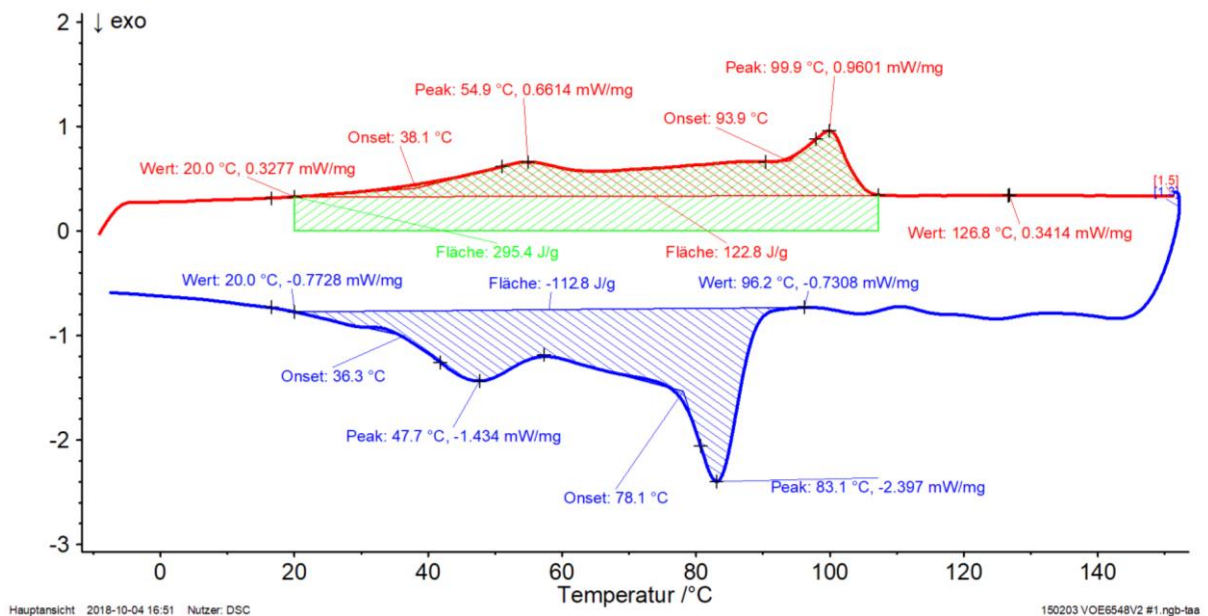
#### 4.8 Wachs: SSW 3

DSC /(mW/mg)



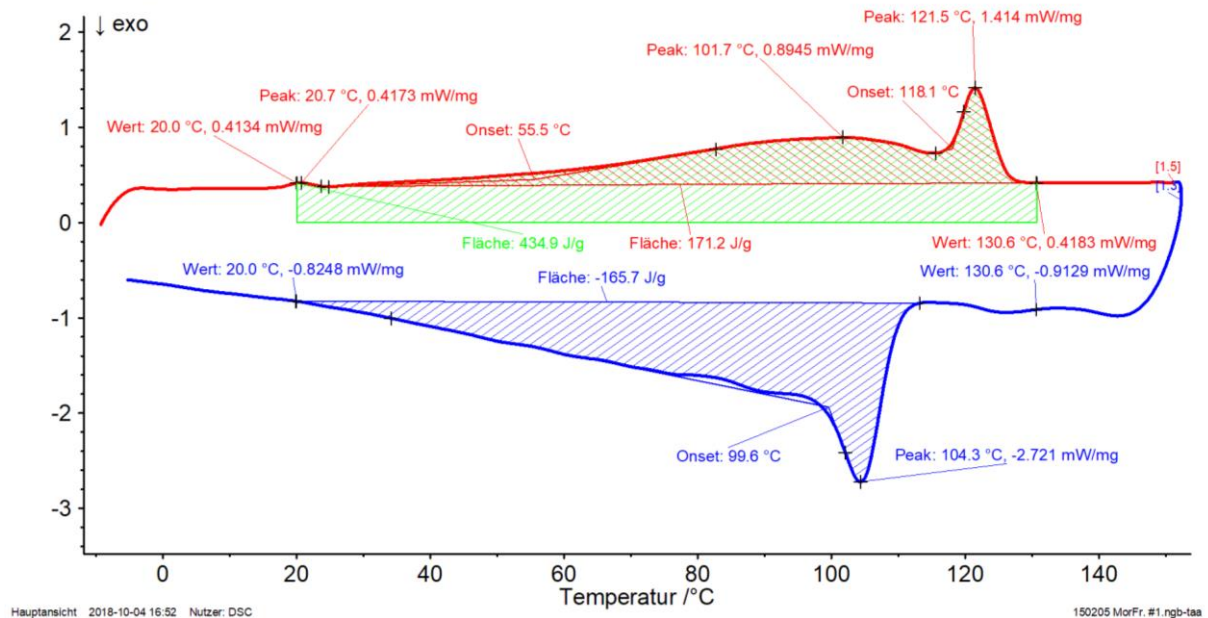
#### 4.9 Wachs: VOE 6548-V2

DSC /(mW/mg)



#### 4.10 Wachs: MORFr

DSC /(mW/mg)





## 5 Zusammenfassende Auswertung und Resümee

### DSC Schmelzpeak

Der DSC Schmelzpeak der Aufheizkurven wird bei thermoplastischen Kunststoffen in der Literatur oft als Schmelztemperatur  $T_s$  angesehen und der DSC Abkühlpeak der Abkühlkurve als Kristallisationstemperatur  $T_k$ , wobei diese bei Wachsen in ein mehr oder weniger breites und unscharfes Schmelzintervall verschwimmen. Die Peaks der Heiz- und Kühlkurven (bzw. die Verläufe der Enthalpie) sind aufgrund der sekundären als auch molekularen Keimbildung, welche nur während des Kristallisierens bzw. Abkühlens auftreten, zueinander verschoben. Dadurch liegt die Kristallisationstemperatur im Vergleich zur Schmelztemperatur bei niedrigeren Temperaturen. Zudem ist der Kristallisationsgrad stark von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Wie beim CWF können dabei auch mehrere unterschiedlich starke DSC Schmelzpeaks auftreten, die auf einen Wachscompound, also ein Gemisch aus verschiedenen Einzelwachsen, schließen lassen.

### DSC Onsetwert

Anhand der DSC Kurve ist es ebenfalls möglich die Glasübergangstemperatur  $T_G$  (auch Erweichungstemperatur oder -bereich EB) als charakteristische Temperatur zu ermitteln. Wie beim Wachs CFW zu sehen ist Aufheizkurve zwischen 40°C und 50°C) erscheint der Glasübergang dabei wie ein thermischer Übergang 2. Ordnung (stufenartige Änderungen der Basislinie), ist aber dennoch kein thermischer Übergang, d.h. kein Gleichgewichtsübergang. Bei den teilkristallinen Materialien wie Wachsen wird dieser Bereich oft durch den Schmelzpeak überlagert und ist daher nicht eindeutig zu erkennen. Vereinfacht kann daher der angegebene DSC Onset-Wert der Aufheizkurve als charakteristische Temperatur des Beginns einer starken Erweichung herangezogen werden und somit als obere Grenze des thermischen Gebrauchsbereichs eines Wachses angesehen werden.

Obwohl die DSC Messungen exakte Peak- und Onset-Werte liefern, können diese nach für z.B. Paraffine einer starken Streuung unterliegen und sollten daher besonders für Wachse nur als Richtwerte betrachtet werden. Begründet liegt dieses in der geringen Wärmeleitfähigkeit von Wachsen (reines Paraffin laut Literatur etwa  $\lambda = 0,2 \text{ W/mK}$ ), wodurch sich in den Proben selbst, je nach gewählter Heizrate, unterschiedliche Temperaturgradienten ausbilden, deren Einfluss nicht vom Messgerät erfasst werden kann. So werden die temperaturabhängigen Verläufe der spezifischen Wärme mit zunehmender Heizrate zu immer höheren Temperaturen verschoben und zudem bei starken Abkühlrate die Kristallbildung zu Gunsten amorpher Phasen behindert.

### DSC Schmelzenthalpie

Durch Integration der Fläche unter dem Verlauf der Kurve der spezifischen Wärmekapazität über die Temperatur kann die zum Schmelzen der Wachse notwendige Schmelzenthalpie (Schmelzenergie) berechnet werden.

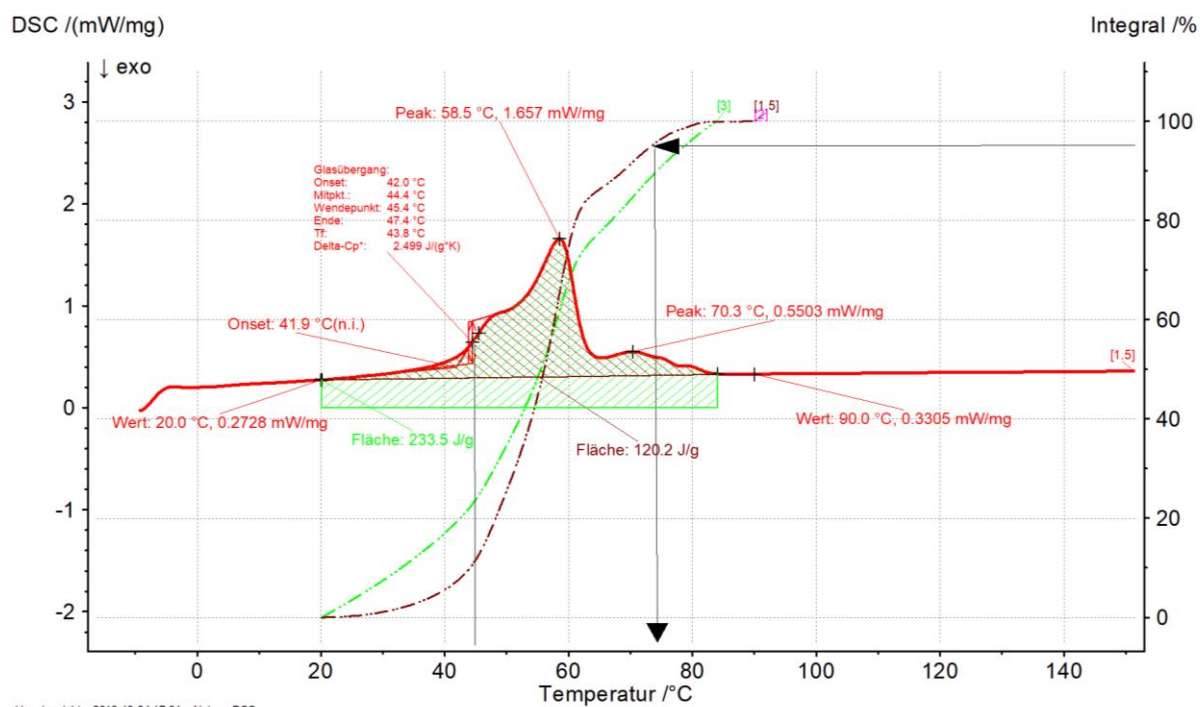
Beim Vergleich der ermittelten Schmelzenthalpie in Tabelle 1 wird deutlich, dass diese je nach Wachs stark variiert. Wird der DSC Schmelzpeak und die Schmelzenthalpie (Schmelzenergie) verglichen, kann (mit Ausnahme von SSW3 und PW3119) eine prinzipielle Korrelation zwischen den Werten festgestellt werden. Mit steigendem DSC Schmelzpeak [°C] nimmt also auch prinzipiell die für das Schmelzen der Wachse erforderliche Schmelzenthalpie bzw. Schmelzenergie zu.

Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Wachse PW3146, RC252 und RC253 mit bis zu 40% Terephthalsäure als Füllstoff versetzt sind und somit deutlich weniger Energie zum Schmelzen benötigen, als Wachse ohne Füllstoffe. Für Wachse ohne Füllstoff erscheint eine Schmelzenergie von etwa 120 J/g als ein geringer Wert.

Tabelle 1: Relevante Ergebnisse der DSC Analyse für die 10 ausgewählten Wachse

Wachs	Tropfpunkt/-bereich [°C] (Datenblatt)	DSC Onset [°C] Aufwärmkurve	DSC Schmelzpeak [°C]	DSC Abkühlpeak [°C]	DSC Energie Phasenumwandlung $E_{Ph}$ [J/g]	DSC gesamt Schmelzenergien $E_{Schm}$ [J/g]
CFW	73 - 79 EP (62 - 66)	41,9	58,5	49,6	120,2	233,5
PC	117 - 122	61,1	93,7 & 113,8	98,2	143,6	368,7
PW3119	97	67,5	81,8	71,1	199,6	373,5
PW 3139	110,4	72,3	108,5	93,7	118,9	267,0
PW3146	98,1	47,5	62,3	55	46,69	126,4
RC 253	76,3	41,4	61,3	55,2	61,95	157,0
RC252	80,1	38,6	58,1	54,3	58,17	169,2
SSW3	EP (78 - 83)	70,8	85,6	71,4	225,3	381,8
VOE6548-V2	EP (102,6)	38,1 & 93,9	54,9 & 99,9	47,7 & 83,1	122,8	295,4
MORFr	80 – 130	55,5 & 118,1	101,7 & 121,5	104,3	171,2	434,9

### CFW – Ableitung des Tropfpunktes aus der DSC Analyse bei Aufnahme von 95% der Energie zur Phasenumwandlung



Anhang E: Rohdichte und thermische volumenspezifische Ausdehnung von Wachsen

## Versuchsprotokoll:

Titel:	Bestimmung der Rohdichte und der thermischen volumenspezifischen Ausdehnung von Wachsen ( <i>nach dem Archimedischen Prinzip</i> )
Thema:	Non Waste Wachsschalungen DFG
Versuchsnummer:	ITE_150302
Datum:	07.04.2015
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Jeldrik Mainka

### 1. Ziel des Versuchs / Erwartete Ergebnisse:

Der Versuch soll Auskunft über die Rohdichte und den temperaturabhängigen thermischen Raumausdehnungskoeffizienten  $\gamma$  (auch thermischer Volumenausdehnungskoeffizient) von unterschiedlichen technischen Wachsen liefern, welche als Schalungsmaterial für freigeformte Betonbauteile verwendet werden sollen. Da sich bei Wachsen der thermische Volumenausdehnungskoeffizient über die Temperatur ändert, wird im Folgenden zur besseren Vergleichbarkeit die thermische volumenspezifische Ausdehnung zur Bezugstemperatur 20°C verwendet.

Die vorab durchgeführte Versuchsreihe zur Bestimmung der thermischen volumenspezifischen Ausdehnung von Wachsen nach dem Verfahren von M. Schimmelpfennig, K. Weber, F. Kalb, K.-H. Feller, T. Butz und M. Matthäi, welches in „Volumenausdehnung von Paraffinen aus Steigrohr-Messungen“ beschrieben ist, hat leider keine verwendbaren Ergebnisse geliefert, da diese Methode nur für Wachse geeignet zu sein scheint, die bei niedrigen Temperaturen unter 60°C schmelzen. Die mittels Steigrohr-Dilatometer gemessene thermische volumenspezifische Ausdehnung der Wachse in einem Wasserbad lieferte ab einer Temperatur von etwa 40°C aufgrund einer unkontrollierbaren Luftblasenbildung im Wasser nur noch unzureichend genaue Ergebnisse.

Die Rohdichte der Wachse und ihre thermische volumenspezifische Ausdehnung werden daher in dieser Versuchsreihe mittels erweitertem Archimedischen Prinzip ermittelt. Erweitert, da nicht nur die Rohdichte bei Raumtemperatur, sondern auch für den Temperaturbereich 10 bis 60 °C in Schritten von 10K untersucht werden soll. Da die Rohdichtemessung von flüssigem Wachs mit der verwendeten Waage nach dem Archimedischen Prinzip nicht möglich ist, wird die Rohdichte des flüssigen Wachses in einem zweiten Schritt durch Wiegen eines bekannten Volumens an Schmelze (geschmolzenem Wachs) in einer separaten Messung durchgeführt.

Die Ergebnisse werden dazu benötigt das Verhalten der unterschiedlichen Wachse bei Temperaturänderung vorhersagen zu können. Die Ergebnisse sind u.a. aus zwei Gründen für die Forschung relevant:

Die Rohlinge (Wachsblöcke) für die Fräsbearbeitung werden durch Gießen erstellt. Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand kontrahiert das Wachs und es entstehen Zwangsspannungen im Material, welche zum Aufreißen der Wachsblöcke oder zu deren Verformung führen können. Da die Wachsblöcke im Herstellungsprozess ggf. nochmals über Ihrer Glasübergangstemperatur erwärmt werden sollen, um in die

endgültige Form gepresst zu werden, ist es zudem wichtig, die Kontraktion des jeweiligen Waxes von der Glasübergangstemperatur zur festen Phase (20°) zu kennen.

Des Weiteren sollen die Untersuchungen grundlegende Informationen über das Verhalten des Waxes während des Abbinden bzw. während der Entstehung von Hydratationswärme des Betons geben. Durch die im Abbindeprozess des Betons entstehende Hydratationswärme wird das Wachs erwärmt und somit thermisch ausgedehnt. Dieses kann eventuell zu Geometrieänderungen der Wachsschalung führen. Auf Basis der ermittelten Volumenänderung könnte so die Geometrieänderung vorausberechnet werden.

## 2. Materialien und Grundlagen

### 2.1. Wachse

Hersteller	Bezeichnung	Erstarrungspunkt EP/ Tropfpunkt TP
Tromm GmbH	CFW	EP 62 - 66°C / TP 73 - 79°C
ROMONTA GmbH	PW3146	TP 98,1°C
ROMONTA GmbH	RC252	TP 80,1 °C
ROMONTA GmbH	RC253	TP 76,3 °C
ROMONTA GmbH	PW3139	TP 110,4 °C
Völpker Spezialprodukte GmbH	VOE6548	TP 102,6
Sasol Wax GmbH	SSW3	EP 78 – 83 °C
Tromm GmbH	PC Polycerit N174	TP 117 – 122 °C

Das Wachs PW3119 sollte ursprünglich ebenfalls untersucht werden, musste aber von dem Versuch ausgeschlossen werden, da die damit hergestellten Probekörper auseinandergebrochen sind und das Wachs daher als zu spröde eingestuft wurde.

### 2.2. Archimedische Messung (Temperaturbereich 10 bis 60 °C)

Die Untersuchungen nach dem Archimedischen Prinzip wurden in den Laboren des Instituts für Technische Chemie, Abt. Makromolekulare Stoffe, der Technischen Universität Braunschweig von Prof. Dr. Henning Menzel mit dessen freundlicher Unterstützung durchgeführt.

Für die Messungen wurden folgende Materialeien verwendet:

- Je Wachstyp zwei Proben a etwa 10 g
- Waage Methler Tolloedo AT261 DeltaRange „Fact“ (Auflösung 0,1 mg)
- Archimedischer Aufsatz für Waage Methler Tolloedo AT261 DeltaRange
- Versuchsofen zum Erwärmen der Wachsproben
- Fluke Datenlogger (Temperatur K Element) zur Überprüfung der Wachs Kerntemperatur im Ofen
- Heiz-Kolben und Temperaturregierungseinheit für das Wasserbecken der Waage

### 2.3. Ermittlung der Rohdichte des flüssigen Wachses durch Wiegen eines bekannten Volumens an Schmelze (Temperatur des Wachses über dem jeweiligen Tropfpunkt)

- Keramisches Gefäß mit einem Volumen von 350 ml (Eigengewicht 261 g)
- Versuchsofen zum Erwärmen des Wachses
- Waage zur Bestimmung des Gewichts des Wachsvolumens (Auflösung 0,1 g)

## 3. Versuchsaufbau und Durchführung

### 3.1. Messung nach dem Archimedischen Prinzip (AP) (Temperaturbereich 10 bis 60 °C)



Bild 1: Messung nach dem Archimedischen Prinzip: Gießen der Probekörper (links) Messung des Gewichts der Wachsprobe an Luft (Mitte), Messung des Auftriebs (bzw. Gewichts) im beheizten Wasser (rechts)

Im ersten Schritt wurden für alle Wachse je zwei Wachsproben hergestellt. Jede Wachsprobe wurde bei 20°C an der Luft und anschließend unter Wasser gewogen, um nach Formel 1 die Referenzrohndichte  $\rho_{20}$  bei 20° C zu ermitteln.

$$\rho_t = \frac{A}{A - B}(\rho_0 - \rho_A) + \rho_A \quad (1)$$

$\rho_t$  = Rohdichte der Wachsprobe bei Temperatur t

A = Gewicht der Wachsprobe an der Luft

B = Gewicht der Wachsprobe in der Flüssigkeit (Wasser)

$\rho_0$  = Rohdichte der Flüssigkeit (Wasser bei Temperatur t)

$\rho_A$  = Rohdichte von Luft (0.0012 g/cm<sup>3</sup>)

Je nach Dichte des Wachses bzw. ob dieser im Wasser aufschwimmt oder absinkt, wurde ein konkaver oder konvexer Siebträger im Wasserbad verwendet. Da Luftblasen im Wasser sich an die Wachsproben haften könnten, wurde zur Entgasung des Wasserbades das Wasser mit einem Tropfen Tensid (Spülmittel) versehen. Zudem wurden Luft-Anhaftungen an den Wachsproben mit einer Einwegspritze einschl. Kanüle abgesaugt. In den folgenden Schritten wurden die Wägungen des ersten Schrittes in Analogie für die Temperaturen 10, 30, 40, 50, 60°C durchgeführt. Die Wachsproben wurden dabei im Ofen solange aufgeheizt, bis die Kerntemperatur einer mit einem Typ K Temperatursensor versehenen Referenzprobe der jeweiligen Solltemperatur entsprach. Um ein Abkühlen der Wachsprobe im Wasserbad zu verhindern, wurde das Wasserbad über einen Heizkolben ebenfalls auf die entsprechende Solltemperatur des Messschrittes erwärmt.



Ab einer Temperatur von 60°C wurden die Wachsproben CFW, PW2146, RC253 und RC253 zu weich, um gewogen zu werden, und das Wasserbad ließ sich nicht ohne eine Beschädigung der Wage zu riskieren über 60°C erhitzen. Alle Proben wurden nach Beendigung der Messung aufgeschnitten und auf mögliche Lufteinschlüsse im Inneren hin untersucht. Bis auf die Probe RC252, bei welcher makroskopische Lunker im Inneren festgestellt wurden, konnten bei den Probekörpern keine Lufteinschlüsse festgestellt werden.



Bild 2: Je zwei Probekörper v.l.n.r.: – CFW; PW3146; RC252



Bild 3: Je zwei Probekörper v.l.n.r.: – VOE 6548-v2; RC253; PW3139; SSW3; PW3119 (zerbrochen); PC

### 3.2. Rohdichte der Wachsschmelze (WS) bzw. Wiegen eines bekannten Volumens an Wachsschmelze

Da verfahrenstechnisch zwar die Volumenausdehnung der Schmelze, nicht aber der Temperaturbereich zwischen 60°C und der Schmelze von Interesse ist, wurde in diesem Zusatzversuch ausschließlich die Rohdichte bzw. die thermische volumenspezifische Ausdehnung der Schmelze im Bezug zu 20°C bestimmt. Hierzu wurde das jeweilige Wachs auf eine Temperatur kurz über seinem Tropfpunkt erhitzt und somit geschmolzen. Das geschmolzene Wachs wurde in ein exakt 350 ml fassendes Keramikgefäß gegossen und dabei gewogen. Um ein rasches Abkühlen des Wachses zu vermeiden und eine Entlüftung des Wachses zu ermöglichen, wurde das zur Volumenbestimmung verwendete Keramikgefäß ebenfalls auf die Wachsstemperatur vorgeheizt.

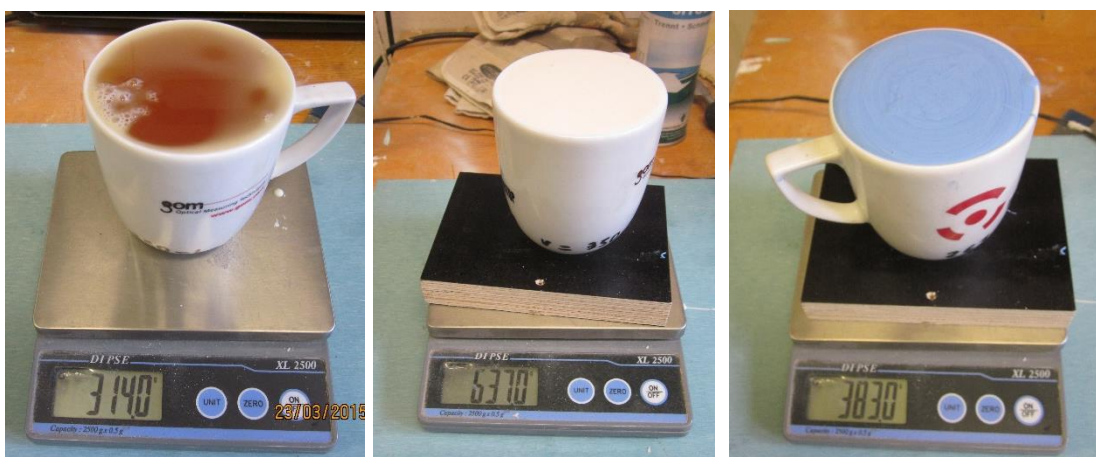


Bild 4: Gewichtsmessung der geschmolzenen Wachse CFW (links), RC252 (Mitte), PW3146 (rechts)

#### 4. Ergebnisbeschreibung

Die Ermittlung der Rohdichte in Abhängigkeit der Temperatur wurde von 10°C bis 60°C nach dem Archimedischen Prinzip (AP) jeweils an zwei Referenzproben durchgeführt und anschließend gemittelt. Die Abweichung zwischen den ermittelten einzelnen Rohdichten betrug absolut jeweils unter 10 mg/cm³. Die Ermittlung der Rohdichte der Wachsschmelze (WS) jeweils über der angegebenen Tropfpunkttemperatur wurde ebenfalls zweifach durchgeführt und gemittelt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 1 bzw. Bild 5 dargestellt. Kursiv dargestellte Werte wurden durch lineare Interpolationen errechnet.

Tabelle 1: Mittlere Rohdichten der Wachse in Abhängigkeit der Temperatur [g/cm³]

Verfahren/ Temp. in °C	CFW	PW3146	RC252	RC253	PW3139	VOE6548	SSW3	PC
(AP)/ 10	0,9888	1,1749	1,1869	1,1080	0,9373	0,9654	0,9410	0,9286
(AP)/ 20	0,9848	1,1706	1,1830	1,1032	0,9297	0,9565	0,9340	0,9262
(AP)/ 30	0,9776	1,1651	1,1782	1,0959	0,9198	0,9557	0,9293	0,9213
(AP)/ 40	0,9688	1,1566	1,1695	1,0884	0,9158	0,9396	0,9158	0,9146
(AP)/ 50	0,9478	1,1443	1,1567	1,0751	0,9053	0,9281	0,9053	0,9048
(AP)/ 60	0,9089	1,1194	1,1369	1,0546	0,8949	0,9081	0,9007	0,8942
(WS)/ 80	<b>0,8800</b>	<b>1,0943</b>	<b>1,1100</b>	<b>1,0243</b>	<i>0,8601</i>	<i>0,8713</i>	<i>0,8200</i>	<i>0,8605</i>
(WS)/ 90					<i>0,8426</i>	<i>0,8529</i>	<b>0,7796</b>	<i>0,8436</i>
(WS)/ 100					<i>0,8252</i>	<b>0,8345</b>		<i>0,8267</i>
(WS)/ 115					<b>0,799</b>			<b>0,801429</b>

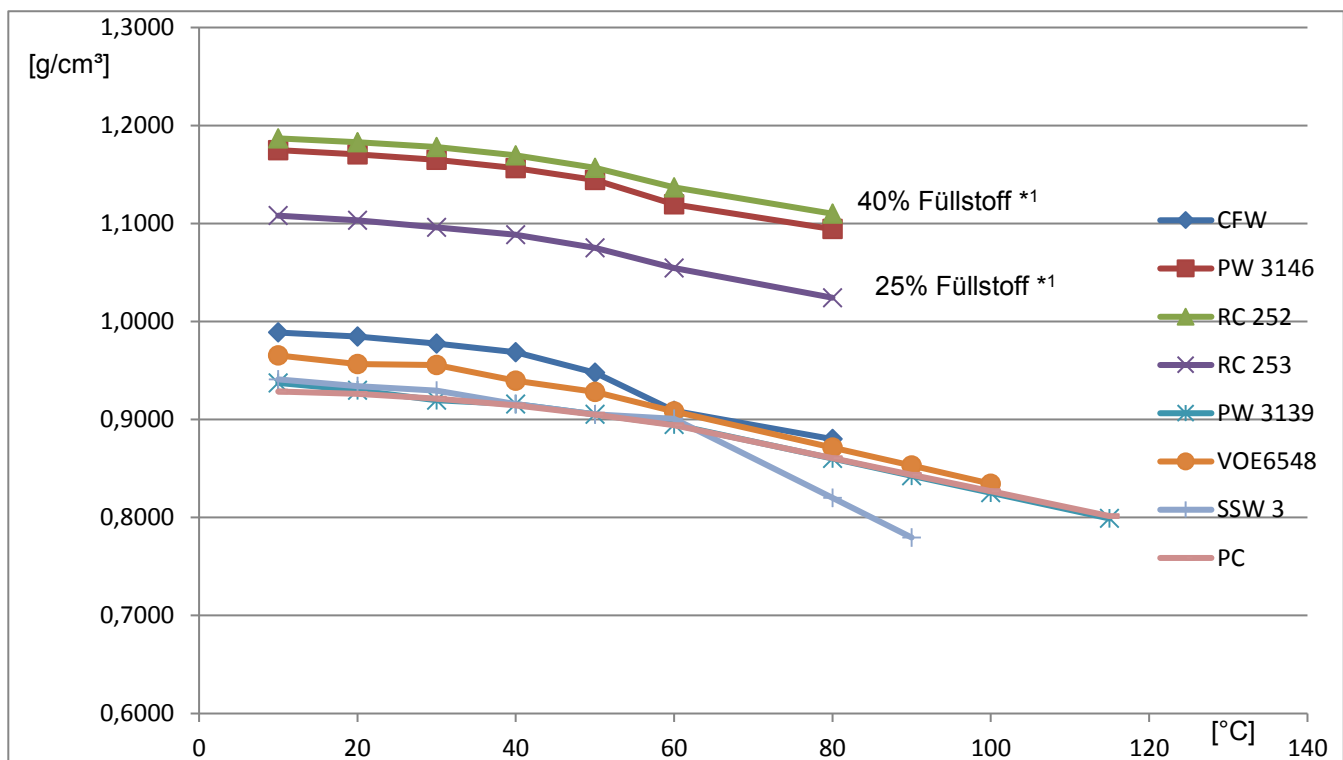
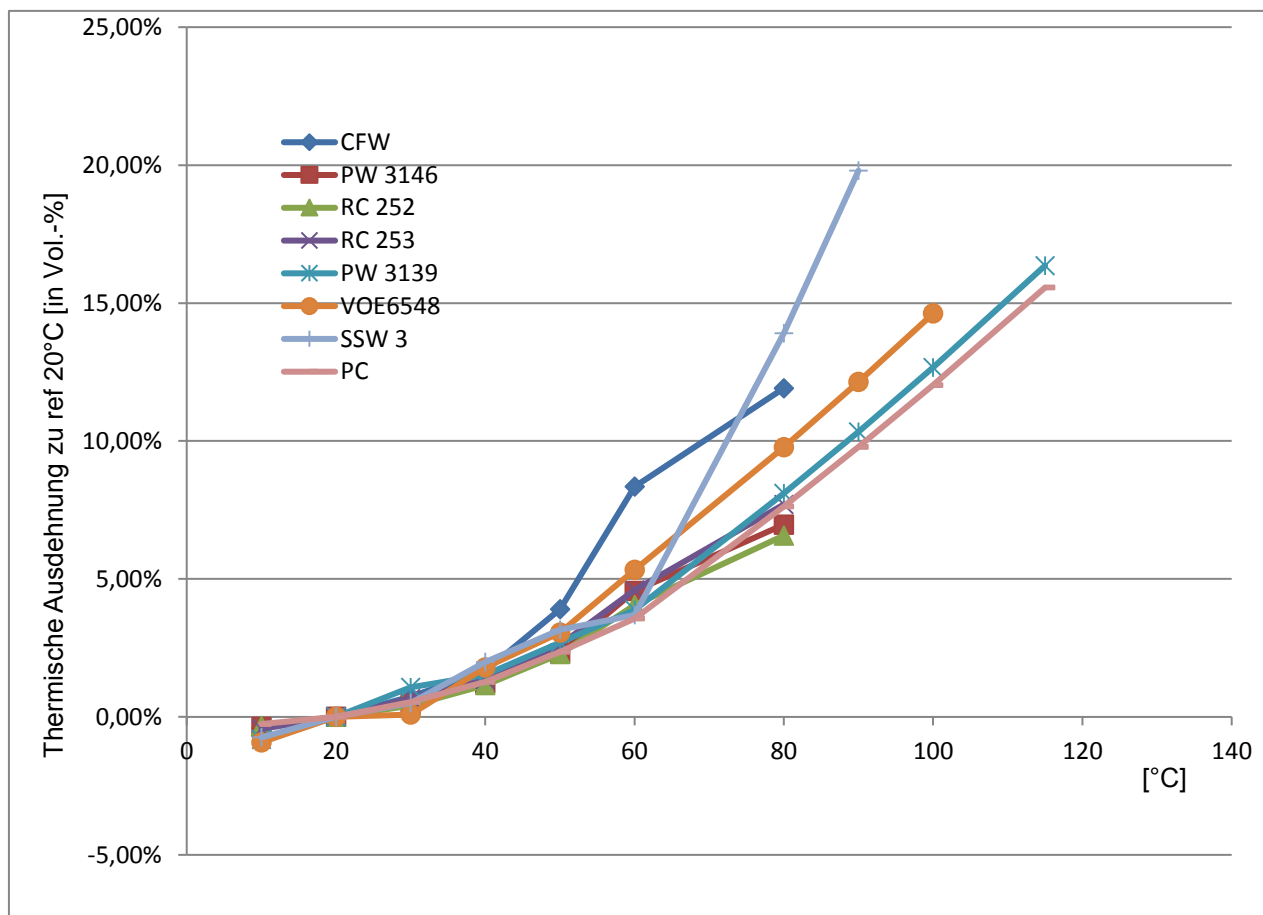


Bild 5: Diagramm 1 - Abnahme der Wachsrohichte bei steigender Temperatur

Aufgrund des Massenerhalts der Wachsproben lassen sich die in Tabelle 1 angegebenen temperaturabhängigen Rohdichten in eine thermische volumenspezifische Ausdehnung normiert zu jeweiligen gemittelten Rohdichte bei 20°C umrechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 bzw. Bild 5 dargestellt.

**Tabelle 2:** Thermische volumenspezifische Ausdehnung normiert zur jeweiligen gemittelten Rohdichte und der Bezugstemperatur 20°C [Vol.-%]

Verfahren/ Temp. in °C	CFW	PW3146	RC252	RC253	PW3139	VOE6548	SSW3	PC
(AP) 10	-0,40%	-0,37%	-0,33%	-0,44%	-0,82%	-0,92%	-0,74%	-0,26%
<b>(AP) 20</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>
(AP) 30	0,74%	0,47%	0,41%	0,66%	1,08%	0,08%	0,50%	0,53%
(AP) 40	1,66%	1,21%	1,16%	1,35%	1,52%	1,79%	1,99%	1,26%
(AP) 50	3,91%	2,30%	2,27%	2,61%	2,69%	3,06%	3,16%	2,36%
(AP) 60	8,35%	4,57%	4,05%	4,60%	3,88%	5,33%	3,69%	3,57%
(WS) 80	<b>11,91%</b>	<b>6,97%</b>	<b>6,57%</b>	<b>7,70%</b>	8,10%	9,78%	13,90%	7,63%
(WS) 90					10,34%	12,15%	<b>19,80%</b>	9,78%
(WS) 100					12,67%	<b>14,62%</b>		12,02%
(WS) 115					<b>16,36%</b>			<b>15,56%</b>



**Bild 5:** Diagramm - thermische volumenspezifische Ausdehnung normiert zur jeweiligen gemittelten Rohdichte und Bezugstemperatur 20°C

## 5. Zusammenfassende Auswertung und Resümee

Alle untersuchten Wachse zeigen bei Erwärmung die erwartete Abnahme der Rohdichte (Tabelle 1) und somit eine charakteristische thermische volumenspezifische Ausdehnung. Auffällig dabei sind die mit Terephthalsäure (Rohdichte von 1,51 g/cm<sup>3</sup> bei 20 °C) angereicherten Wachse RC253 (Füllstoffanteil 25%), PW3164 und RC252 (Füllstoffanteil 40%), die einen deutlich erhöhte Rohdichte aufweisen.

Im unteren Temperaturbereich von 20°C bis etwa 40°C zeigen alle Wachse eine relativ geringe Ausdehnung (1,1 bis 1,6 Vol.-%), was sich nach Schimmelpfennig auf eine in diesem Bereich noch relativ feste Kristallstruktur zurückführen lässt. Im oberen Temperaturbereich (bzw. vom festen Zustand (20 °C) bis zu ihrem jeweiligen Schmelzpunkt) zeigen die Wachse eine deutlich größere, je Wachs unterschiedlich stark ausgeprägte volumenspezifische Ausdehnung, was sich auf das Lösen der kristallinen und amorphen Strukturen in der Schmelze zurückführen lässt.

Wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, zeigen die mit Terephthalsäure angereicherten Wachse erwartungsgemäß die geringste volumenspezifische Ausdehnung der flüssigen im Vergleich zur festen Phase von nur 6,57 bis 7,70 Vol.-%, was sich auf die Eigenschaften der werkseitig zugefügten Terephthalsäure zurückführen lässt. Terephthalsäure selbst besitzt einen nur sehr geringen thermischen volumenspezifischen Ausdehnungskoeffizienten und geht bei ihrem Sublimationspunkt von 402 °C direkt von der festen in den gasförmigen Aggregatzustand über.

Bei den ungefüllten Wachsen zeigt CFW (bei 80°C) mit 11,91 Vol.-% die geringste volumenspezifische Ausdehnung, gefolgt von VOE6548-v2 (bei 100°C) mit 14,62 Vol.-%, PC (bei 115°C) mit 15,56 Vol.-% und PW3139 (bei 115°C) mit 15,56 Vol.-%. Mit Ausnahme des Wachses SSW3 (bei 90°C) mit 19,80 Vol.-% Ausdehnung bestätigen diese Ergebnisse die Aussage von S Oesterle et.al. von der ETH Zürich in Zero Waste Free-Form Formwork: „Ein höherer Erweichungspunkt führt zu einer härteren Oberfläche, aber auch zu einem spröderen Wachs und einem höheren Grad an thermischer Schrumpfung“.

Werden die Ergebnisse dieses Versuchs dem erstellten Anforderungsprofil für Wachse als Schalungsmaterial gegenübergestellt, erscheint das Wachs PW3146 am besten geeignet, da es eine hohe Tropfpunkttemperatur von 98°C und dabei die nahezu geringste ermittelte thermische volumenspezifische Ausdehnung aufzeigt. Da der Einfluss des in diesem Wachs enthaltenen Füllstoffes Terephthalsäure in Bezug auf eine optimale Fassbarkeit und das Kontaktverhalten zum Beton (es handelt sich hierbei ja um ein saures Material) bisher noch ungeklärt ist, sollte aber mindestens ein weiteres nicht mit Terephthalsäure versetztes Wachs für die Eignung als Schalungsmaterial untersucht werden. Von den ungefüllten Wachsen erscheint CFW am besten geeignet, da es eine ausreichende Tropfpunkttemperatur von etwa 73 °C besitzt und die geringste ermittelte thermische volumenspezifische Ausdehnung aufzeigt.

Werden die ermittelten thermischen volumenspezifischen Ausdehnungen mit denen im DSC Verfahren ermittelten DSC Schmelzpeaks und der Schmelzenthalpie (Schmelzenergie) verglichen, kann wie in Tabelle 3 dargestellt (Ausnahme von SSW3) eine prinzipielle Korrelation zwischen den Werten festgestellt werden. Unter Anbetracht der Bedenken zum Füllstoff Terephthalsäure erfüllen die Wachs PW3146 und CFW somit auch die Forderung aus dem erstellten Anforderungsprofil einer möglichst geringen Schmelzenthalpie / -energie um aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglichst effizient im Closed Loop Recyclingsprozess wieder eingeschmolzen werden zu können.

*Tabelle 3:* Wachse sortiert nach DSC Schmelzenthalpie im Vergleich zur thermischen volumenspezifischen Ausdehnung der Wachse rel. zu 20°C [Vol.-%]

<b>Abk.</b>	<b>Tropfpunkt [ °C] (Datenblatt)</b>	<b>DSC Aufwärm- kurve Onset [°C]</b>	<b>DSC Schmelzpeak [°C]</b>	<b>DSC Schmelz- enthalpie (Schmelz- energie) [J/g]</b>	<b>Volumenzunahme (20°- Tropfpunkt) [V%]</b>
PW3146	98,1	46,7	62,3	47,55	<b>6,97%</b>
RC252	80,1	37	58,1	59,23	<b>6,57%</b>
RC253	76,3	40,1	61,3	68,46	<b>7,70%</b>
CFW	73-79	41,3	58,5	124,6	<b>11,91%</b>
VOE6548-V2	102,6	36 & 94	54,9 & 99,9	130,29	<b>14,62%</b>
PW3139	110,4	20-100 linear	108,4	135,0	<b>16,36%</b>
PC	117 - 122	20-94 linear	93,7 & 113,8	148,19	<b>15,56%</b>
SSW3	78-83	70,7	85,6	212,2	<b>19,80%</b>



## Versuchsprotokoll:

Titel:	Biegezugversuche Wachse
Thema:	Non Waste Wachsschalungen DFG
Versuchsnummer:	ITE_150318
Datum:	18.03.2015
Bearbeiter:	Elena Stein unterstützt durch Jeldrik Mainka

### 1. Ziel des Versuchs / Erwartete Ergebnisse:

Ziel der Versuche ist es, Wachse hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften zu untersuchen, um diese ggf. als Schalungsmaterial für freigeformte Betonbauteile einsetzen zu können. Da Wachs bis jetzt mehr in kleinskaligen Bereichen wie der Zahntechnik oder dem Metallguss und noch nicht in der Bauindustrie genutzt wird, fehlen Herstellerangaben zur Biegefestigkeit, zur Druckfestigkeit und zur Zeitstandfestigkeit. Die Ergebnisse dieser Versuche sollen zudem dazu genutzt werden, um Wachs im Verhältnis zu anderen Materialien, wie etwa Kunststoff, einstufen und bewerten zu können. Außerdem sollen verschiedene Wachse untereinander verglichen werden, um eine Auswahl für weitere Materialprüfungen und Versuche treffen zu können. Bis jetzt ist Wachs in den genannten Bereichen noch nicht erforscht worden, weil es auch noch keine entsprechende Anwendung in technischen Bereichen gefunden hat. Von den Wachsherstellern werden üblicherweise nur die nicht ausreichenden Prüfungen zum Glührückstand, zur Nadelpenetrationshärte, zur Viskosität, zum Erstarrungs- und Tropfpunkt und zu chemischen Eigenschaften, wie etwa der Verseifungszahl, der Säurezahl oder dem Aschegehalt, durchgeführt.

### 2. Materialien und Grundlagen

#### 2.1 Wachse

Folgende in Tabelle 1 aufgeführten Wachse wurden in den Biegezugversuchen geprüft.

*Tabelle 1: Für die Biegezugprüfung verwendete Wachse*

Hersteller	Bezeichnung	Wachsart	Füllstoffe
Tromm GmbH	CFW	Paraffin	-
ROMONTA GmbH	RC253	Montanwachs	25% Terephthalsäure
Völpker GmbH	VOE6548	Montanwachs	-
ROMONTA GmbH	PW 3139	Montanwachs	-
ROMONTA GmbH	RC 252	Montanwachs	40% Terephthalsäure
ROMONTA GmbH	PW 3146	Montanwachs	40% Terephthalsäure
ROMONTA GmbH	PW 3139	Montanwachs	-
Sasol Wax GmbH	SSW 3	FT-Wachs	-
Tromm GmbH	PC	PE-Wachs	-

## 2.2 Herstellung der Wachsprismen als Probekörper:

Die Wachse wurden vor den Versuchen in einem Ofen mit Digital-Temperaturregelungsgerät auf +10 Grad Kelvin über ihrem jeweils angegebenen Tropfpunkt geschmolzen, in eine erwärmte Zementprismenform aus Stahl gegossen und sehr langsam heruntergekühlt, um eine gleichmäßige Kristallisation zu ermöglichen und einen glasartigen Zustand<sup>1</sup> möglichst zu verhindern. Die Zementprismenform weist Innenmaße von 160 mm x 40 mm x 40 mm auf. Als Trennmittel diente das Silikonspray Typ Sitol-Plus von der Firma Technotrenn Trennmittel GmbH bzw. Backpapier.

Da einige Wachse trotz dieser optimierten Gussmethode noch Mängel in der Form der hergestellten Wachsprobekörper, wie eine eingefallene Oberfläche oder nicht parallele Seitenwände, aufwiesen (Abbildung 2.2-1), wurden für eine zweite Versuchsreihe die Probekörper dieser Wachse nach dem Gießen zusätzlich in Form gepresst bzw. umgeformt. Um die Wachsprobekörper noch im plastischen Zustand vor der abgeschlossenen Kristallisation umzuformen, wurden die Probekörper auf Verformungstemperatur erwärmt, die dem On-Set-Wert aus der DSC-Analyse entspricht (Annahme, dass diese etwa der Glasübergangstemperatur entspricht). Bei einigen Wachsen wiesen die gepressten bzw. umgeformten Probekörper trotz dieses Ansatzes Schädigungen in Form von Rissen auf. Die Herstellung der Wachsprobekörper ist in Abschnitt 6 Begleitversuche zur Herstellung der Wachsprismen detailliert dargestellt.



Abbildung 2.2-1: Ergebnis Versuchsreihe CFW (von l. nach r.): in kalte Form gegossener Probekörper / in erwärmte Form gegossener Probekörper / Herstellung wie zweiter Probekörper mit anschließendem Pressen bei 50°C (On-Set-Wert)

## 3. Versuchsaufbau und Durchführung

Die Biegezugversuche wurden am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig am Fachgebiet Baustoffe von Prof. Dr. Harald Budelmann mit dessen und der freundlichen Unterstützung seiner Mitarbeiter durchgeführt. In Analogie zur DIN EN 196-1:2005 wurde die Belastungsanordnung wie in Abbildung 3-2 gewählt (Auflagerabstand allerdings 110 mm) und auf den in Abbildung 3-1 Mitte dargestellten Versuchsaufbau übertragen.

Im ersten Schritt wurden die 36 Stück gegossenen Wachsprobekörper bei einer Raumtemperatur von etwa 20°C geprüft.

Im zweiten Schritte wurden die 11 Stück gepressten Wachsprobekörper bei einer Raumtemperatur von etwa 20°C geprüft.

---

<sup>1</sup> In einem glasartigen Zustand kristallisiert das Wachs nicht optimal. Die langen Molekülketten haben bei einer raschen Abkühlung keine Zeit, ein richtiges Kristallgitter auszubilden, sondern erstarren in einem Zwischenzustand

Im dritten Schritt, der als Tastversuch zu werten ist, wurde eine kleine Auswahl von 6 Stück Wachsprobekörper über zwei Stunden in einem 50° warmen Ofen mit Temperaturregler erwärmt und anschließend bei dieser Temperatur geprüft.

Vor der Prüfung wurden alle Probekörper vermessen. Bei der Prüfung wurde die Belastung in 250N Schritten erhöht und nach jedem Schritt wurde die Durchbiegung an einer Messuhr abgelesen und notiert.



Abbildung 3-1: Prüfmaschine (links); Versuchsaufbau (Mitte), und Probekörper vor der Prüfung (rechts)

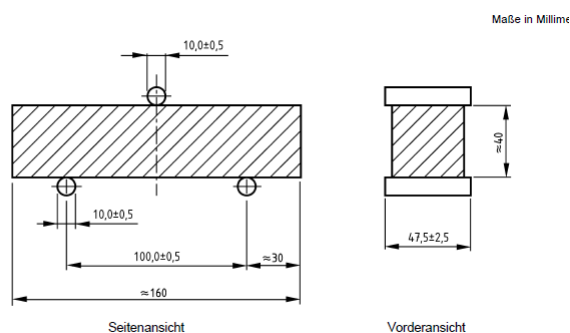


Abbildung 3-2: Belastungsanordnung zur Bestimmung der Biegefestigkeit gemäß DIN EN 196-1:2005

#### 4. Ergebnisbeschreibung

Bei Raumtemperatur von etwa 20°C konnten alle Wachse geprüft werden. Die verwendete manuell betriebene Prüfmaschine konnte im Voraus nicht kalibriert werden, weswegen die gemessenen Ergebnisse als Orientierung bzw. als Vergleichswerte der Wachse untereinander und nicht als Absolutwerte zu betrachten sind. Zudem schwankt die Laststeigerungsgeschwindigkeit durch den manuellen Betrieb, welches einen ungünstigen Einfluss auf die Ergebnisse haben könnte.

Bei einigen Wachsen konnte auf Grund von Schwierigkeiten bei der Herstellung der Probekörper keine jeweils min. drei Stück hergestellt werden (laut DIN EN 196-1:2005 müssen immer drei Versuche am gleichen Material durchgeführt werden). Dies ist der Fall bei den gepressten Probekörpern vom PW 3139 (nur ein gepresster Probekörper) und bei den gegossenen Probekörpern vom CFW (nur zwei gegossene Probekörper). Die Anzahl der geprüften Probekörper je Versuch ist in den Ergebnistabellen jeweils in der Spalte N angegeben.

Bei der Auswertung der ersten beiden Versuchsschritte wurde die maximale absolute Durchbiegung  $s_{\max}$  [mm] durch lineare Extrapolation der Zwischenergebnisse mit Bezug zur Bruchlast ermittelt. Hierdraus wurde nach der folgenden Gleichung die maximale Biegedehnung für die einzelnen Probekörper berechnet.

Biegedehnung bei Erreichen der Bruchlast  $\Delta\varepsilon_{f,max} = \frac{6 \cdot s_{max} \cdot H}{L^2}$

Dabei ist

$\Delta\varepsilon_{(f,max)}$  die Biegedehnung, in [%]

$H$  die Höhe des Querschnitts des Prismas, in Millimeter;

$L$  der Abstand zwischen den Auflagern, in Millimeter.

Die Biegezugfestigkeit (max. Biegespannung Randfaser) [Mpa] auf Basis der Bruchlast wurde entsprechend DIN EN 196-1:2005 für Zementprismen nach der folgenden Gleichung für die einzelnen Probekörper berechnet

Max Biegespannung Randfaser :  $\Delta\sigma_{f,max} = \frac{3 \cdot F_B \cdot L}{2 \cdot B \cdot H^2}$

Dabei ist

$\Delta\sigma_{f,max}$  die Biegezugfestigkeit (max. Biegespannung Randfaser), in Megapascal;

$B$  die Seitenlänge des Querschnitts des Prismas, in Millimeter;

$F_B$  die auf die Mitte des Prismas aufgebrachte Bruchlast, in Newton;

Das Biegemodul wurde entsprechend DIN EN ISO 178 (Bestimmung der Biegeeigenschaften von Kunststoffen) ermittelt.

Die im dritten Schritt geprüften Probekörper mit einer Kerntemperatur von 50°C konnten nicht vollständig in Analogie zu den ersten beiden Schritten geprüft werden. Bei den Versuchen war nur eine maximale Belastung ablesbar, da sehr hohe Verformungen stattfanden und nur wenig Last aufgebracht werden konnte. Es wurde jeweils nur ein Probekörper von fünf ausgewählten Wachsen (6 Probekörper) bei 50°C geprüft.

## 5. Auswertung und Resümee

In den ersten beiden Versuchsschritten bei etwa 20°C zeigten alle geprüften Wachse ein nahezu linear-elastisches Verhalten und versagten in einem Sprödbbruch bei Erreichen der Bruchlast.

### 5.1 (G) Gegossene Probekörper (erster Schritt)

Tabelle 1: Versuchsergebnisse der gegossenen Wachsprbkekörper (Mittelwerte)

Wachs	N [-]	Bruchlast $F_B$ [N]	Absolute Durch- biegung $s_{max}$ bei $F_B$ [mm]	Biege- dehnung $\Delta\varepsilon_{f,max}$ [%]	s [%]	Max Biegespannung Randfaser (Biegezugfestigkeit) [N/mm <sup>2</sup> ] $\Delta\sigma_{f,max}$	s [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegemodul $E_f = \sigma/\varepsilon$ $\Delta E_f$ gemittelt [N/mm <sup>2</sup> ]	s [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>CFW</b>	G	2	1790,33	2,30	4,38	1,44	5,57	145,49	41,14
<b>RC 253*</b>	G	5	1781,50	0,82	1,61	0,20	5,08	301,10	46,45
<b>VOE 6548</b>	G	3	1046,40	0,78	1,49	0,10	3,32	209,41	5,58
<b>PW 3139</b>	G	5	1618,65	1,21	2,31	0,37	4,72	192,35	23,11
<b>RC 252*</b>	G	3	2517,90	1,00	1,99	0,61	7,16	361,73	119,46
<b>PW 3146*</b>	G	4	2256,30	1,01	2,00	0,33	6,96	325,31	74,18
<b>PW 3119</b>	G	3	1635,00	0,88	1,65	0,34	5,73	334,95	16,13
<b>SSW 3</b>	G	5	1098,72	0,81	1,54	0,32	4,28	274,12	65,86
<b>PC</b>	G	3	1332,53	1,30	2,47	0,33	4,45	166,99	45,13
<b>CFW Holz*</b>	G	1	1716,75	1,70	3,41	-	5,51	164,62	-

\*Wachse mit Füllstoffen

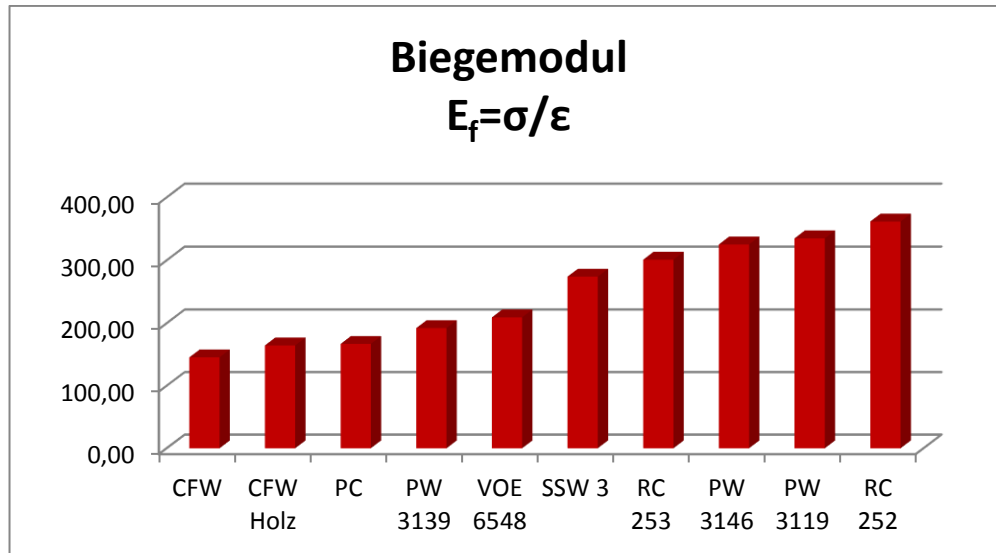
\*\*CFW Holz ist gefüllt mit 15 % Holzspänen Eiche ≤ 1mm (zusätzlicher Tastversuch)

N Anzahl der Versuche

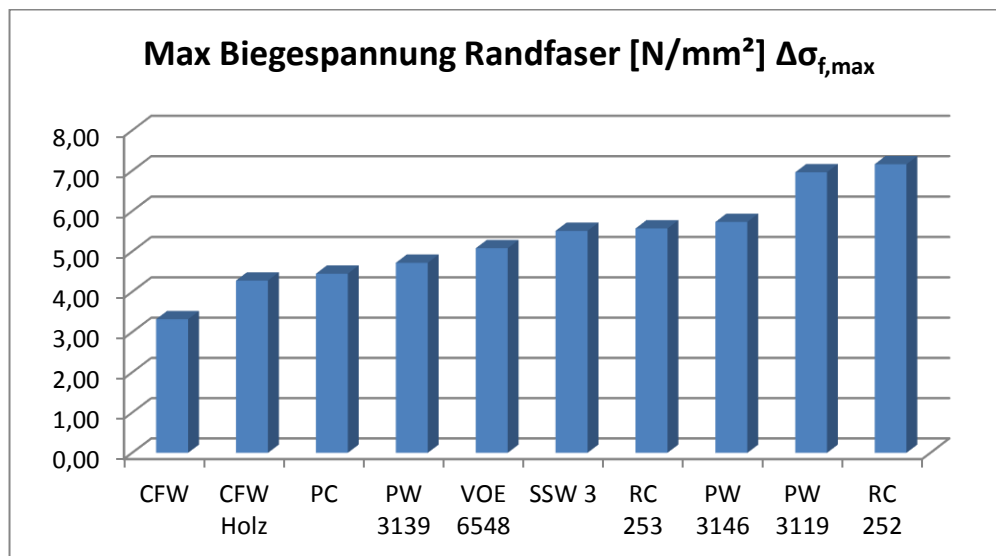
s Standardabweichung

Trotz der erwarteten teilweise relativ hohen Standardabweichung  $s$  der Ergebnisse in Tabelle 1, sind signifikante Unterschiede zwischen den Wachsen hinsichtlich ihres Biegetragverhaltens zu erkennen und ein quantitativer Vergleich ist möglich.

In den folgenden *Abbildung 5.1-1*, *Abbildung 5.1-2* und *Abbildung 5.1-3* sind die ermittelten Ergebnisse aus Tabelle 1 grafisch dargestellt.



*Abbildung 5.1-1: Darstellung der ermittelten Biegemodule der Wachse, sortiert nach Größe*



*Abbildung 5.1-2: Darstellung der ermittelten maximalen Biegespannung der Randfaser der Wachse, sortiert nach Größe*



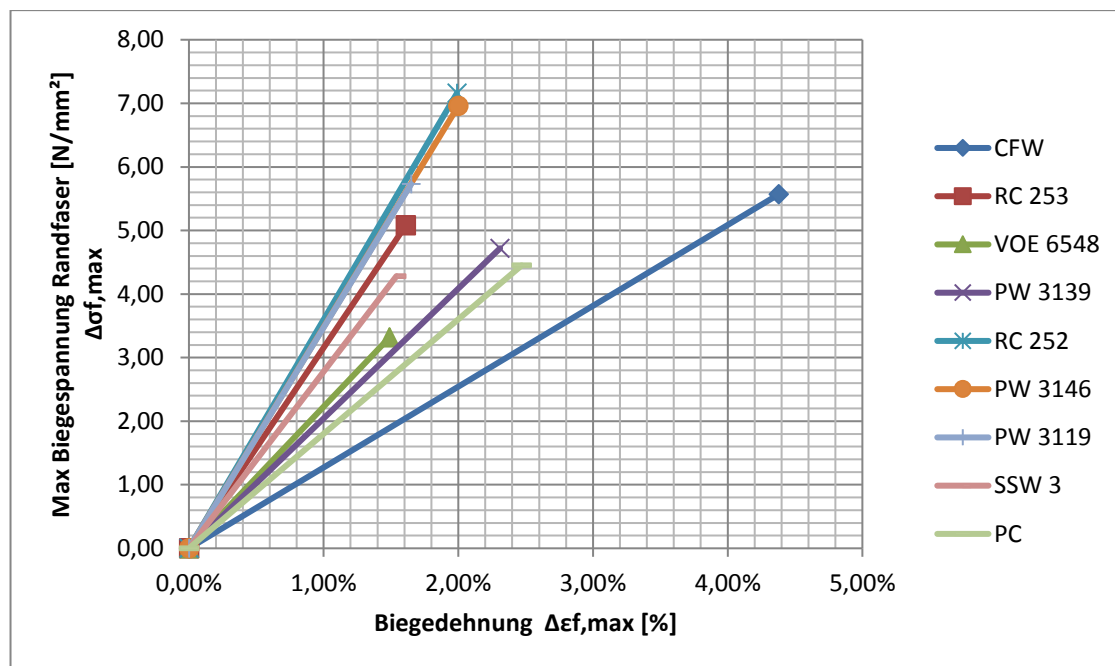


Abbildung 5.1-3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Wachse mit gemittelten Werten

Das Wachs CFW zeigt den geringsten Biegemodul, dabei aber die größte maximale Biegedehnung aller untersuchten Wachse. Die Wachse RC 252 oder das PW 3146 zeigen die höchsten Biegezugfestigkeiten und das höchste Biegemodul, die Biegedehnung ist dabei allerdings geringer. Diese beiden Wachse verhalten sich also deutlich spröder, was sich u.a. auf den enthaltenen Füllstoff zurückführen lässt.

Um die untersuchten Wachse mit anderen Werkstoffen hinsichtlich ihres Biegemoduls qualitativ vergleichen zu können, sind in der nachstehenden Tabelle verschiedene E-Module unterschiedlicher Werkstoffe dargestellt. Der Vergleich zwischen E-Modul (aus zentrischen Zugversuchen) und Biegemodul ist dabei möglich, da die Werte nur wenig voneinander abweichen. In einem Fachbeitrag von C.JAROSCHEK in der Zeitschrift Kunststofftechnik wurde am Beispiel der Kunststoffe<sup>2</sup> nachgewiesen, dass die E-Modul-Werte aus Zugversuchen nur etwa 5% höher als die Werte aus Biegezugversuchen liegen.

Tabelle 2: Beispielhafter Vergleich E-Module von gegossenen Probekörpern zu anderen Materialien

Werkstoff		E-Modul in N/mm²
Wachs	CFW	145
	PW 3146	325
	RC 252	360
Kunststoffe / Thermoplasten	Polyethylen (PE) weich	200 – 500
	Polypropylen (PP)	1200
	Polyamid (PA)	1400
	Polyvinylchlorid (PVC) hart	1000 – 3500
	Polystyrol (PS) hart	1900 - 2700
	Polymethylmethacrylat (PMMA)	2700 – 3200

Wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, erreichen die untersuchten Wachse einen ähnlichen E-Modul-Wert wie weiche Thermoplasten wie z.B. Polyethylen (PE) weich.

<sup>2</sup> C.JAROSCHEK, "Rezensierter Beitrag aus der Praxis -Das Ende des Biegemoduls," *Kunststofftechnik*, Nr. 8, 2012.

## 5.2 (P) Gepresste Probekörper (zweiter Schritt)

Tabelle 3: Versuchsergebnisse der gepressten Wachsprobekörper (Mittelwerte)

Wachs	N [-]	Bruchlast F <sub>B</sub> [N]	Absolute	Biege- dehnung Δε <sub>f,max</sub> [%]	s [%]	Max	s [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegemodul	s [N/mm <sup>2</sup> ]
			Durch- biegung s <sub>max</sub> bei F <sub>B</sub> [mm]			Biegespannung Randfaser (Biegezugfestigkeit) [N/mm <sup>2</sup> ] Δσ <sub>f,max</sub>		E <sub>f</sub> =σ/ε ΔE <sub>f</sub> gemittelt [N/mm <sup>2</sup> ]	
CFW	P 3	1038,23	1,23	2,48	0,51	3,21	0,65	127,44	23,67
VOE 6548	P 3	840,39	0,80	1,58	0,21	2,65	1,10	153,21	40,77
PW 3139	P 1	735,75	0,90	1,79	-	2,25	-	118,17	-
SSW 3	P 3	680,57	0,86	1,70	0,75	2,61	0,98	182,31	89,68

Im Vergleich der Versuchsergebnisse der gegossenen Wachsprobekörper (Tabelle 2) mit denen der durch Pressen bei On-Set-Temperatur umgeformten Wachsprobekörper (Tabelle 3) ist zu erkennen, dass das Biegemodul, die Bruchlast und die maximale Biegespannung an der Randfaser bei den gepressten Körpern deutlich geringer ausfallen. In Tabelle 4 sind zum Vergleich die ermittelten Biegemodule als prozentuale Werte dargestellt.

Tabelle 4: Vergleich der Biegemodule der gegossenen mit denen der durch Pressen umgeformten Wachsprobekörper

Wachs	Biegemodul der gegossenen Körper (G) [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegemodul der gepressten Körper (P) [N/mm <sup>2</sup> ]	P in % von G
CFW	145,49	127,44	87,59%
VOE 6548	209,41	153,21	73,16%
SSW 3	274,12	182,31	66,51%

Obwohl die gepressten Wachsprobekörper eine deutlich bessere Form bzw. Maßhaltigkeit besitzen (vergl. Abbildung 2.2-1) zeigt der Vergleich der Versuchsergebnisse in Tabelle 4: Vergleich der Biegemodule der gegossenen mit denen der durch Pressen umgeformten Wachsprobekörper Tabelle 4, dass anscheinend durch das Pressen die Kristallstruktur der Wachse geschädigt wird, was zu einem Festigkeitsverlust führt.

## 5.3 Biegezugversuch bei 50°C (dritter Schritt)

Wie eingangs erwähnt, handelt es sich bei diesen Versuchen lediglich um Tastversuche, um das Verhalten der Wachse über ihrer On-Set-Temperatur qualitativ bewerten zu können.

Tabelle 5: Ergebnisse Biegezugversuch bei 50°C

Wachs	Max. Kraft $F_{max} = F \cdot g$ [N]	Max Biegespannung Randfaser (Biegezugfestigkeit) [N/mm <sup>2</sup> ] $\Delta \sigma_{f,max}$	Onset [°C]
CFW - 5 (G)	245,25	0,07	41,30
CFW - 1 (P)	245,25	0,07	41,30
PW 3146 - 1 (G)	490,50	0,13	46,70
RC 252 - 1 (G)	245,25	0,07	37,00
VOE 6548 - 3 (G)	245,25	0,08	36 & 94
SSW 3 - 10 (G)	294,30	0,10	70,70

P und G stehen dafür, ob der Probekörper bei der Herstellung nur gegossen (G) oder zusätzlich gepresst (P) wurde. Bei fast allen in diesem dritten Schritt untersuchten Wachsen liegt der On-Set-Wert aus der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) Analyse unter 50°C, das heißt die Wachse beginnen bei 50°C prinzipiell schon zu schmelzen und fangen an ihre feste Kristallgitterstruktur zu verlieren. An den

Versuchsergebnissen ist zu erkennen, dass bei Temperaturen über dem On-Set-Wert das Wachs sehr schnell seine Tragfähigkeit verliert. Die maximal aufnehmbaren Lasten waren daher sehr viel geringer als bei 20°C und wichen kaum voneinander ab. Bei den untersuchten Wachsen sind allerdings verschiedene Versagensmechanismen zu erkennen (Abbildung 5.3-1). Zum einen gab es Wachse mit Sprödb Brüchen, wie z.B. das Wachs SSW 3, zu erkennen auf Abbildung 5.3-2, zum anderen gab es Wachse, die sich unter der Last nur stark verformt haben. Dabei sind deutliche Scherflächen und Einschnürungen mit Einschnürungsbrüchen, wie in Abbildung 5.3-2 und Abbildung 5.3-3 zu erkennen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die On-Set-Temperatur aus der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) in etwa der Glasübergangstemperatur entspricht. Da die Wachse über dieser Temperatur kaum noch in der Lage sind, Belastungen standzuhalten und sich plastisch verformen, sollte die maximale Temperatur, bei der Wachse z.B. als Schalungsmaterial für Beton eingesetzt werden, die On-Set-Temperatur als maximaler thermischer Gebrauchsbereich nicht überschreiten.

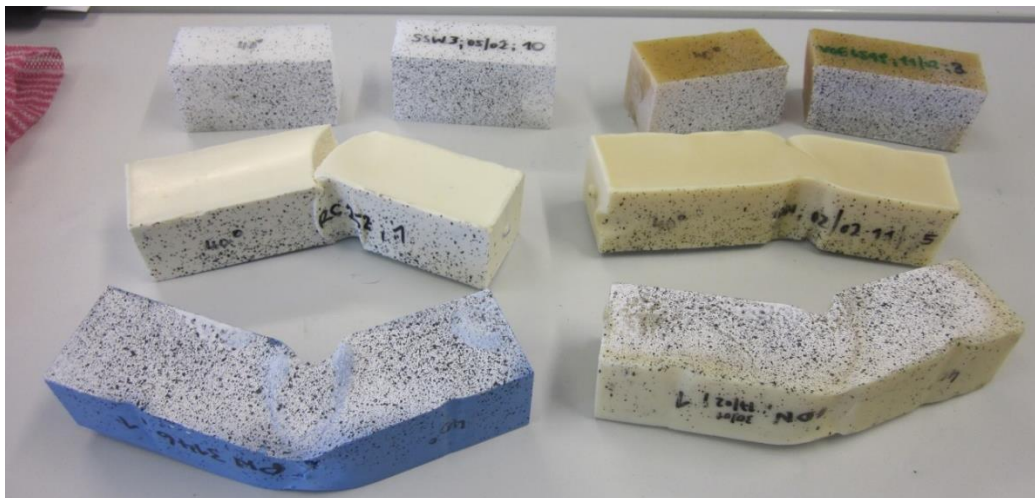


Abbildung 5.3-1: Bei 50°C geprüfte Probekörper - Übersicht



Abbildung 5.3-2: Sprödbbruch beim SSW 3 bei 50°C



Abbildung 5.3-3: PW 3146 bei 50°C: Deutlich zu erkennende Scherflächen (links), Einschnürungsbruch (rechts)



## 6. Begleitversuche zur Herstellung der Wachsprismen

### Gießen der Probekörper:

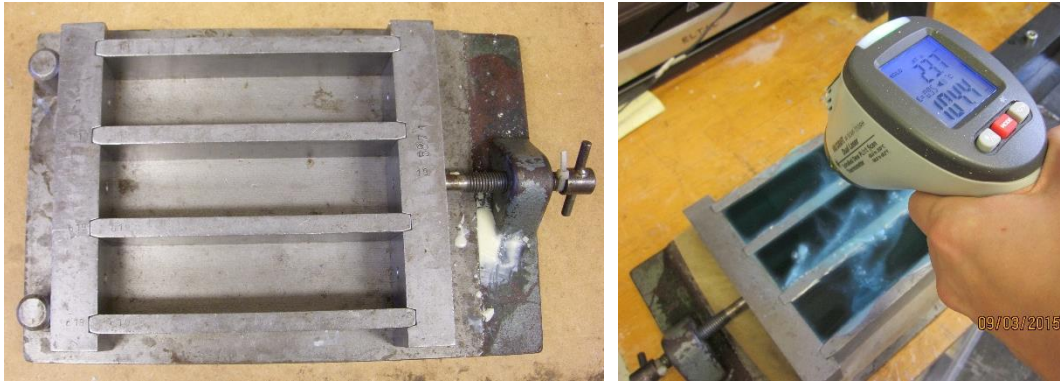


Abbildung 6-1: Zementprismenform aus Stahl (links), gegossenes Wachs in erhitzter Zementprismenform (rechts)

### Pressen der Probekörper:





Abbildung 6-2: Pressform mit Wachsprbekörper und Druckstempel im Ofen (links), Pressen des Wachses in einer Hydraulikpresse - zu sehen ist, wie überschüssiges heißes Wachs aus der Form quillt (rechts)

### Schäden an den hergestellten Probekörpern:






Abbildung 6-3: Gepresster Probekörper mit Rissen - VOE 6548 (links), aAbgekühlter Probekörper in der Zementprismenform mit erkennbaren Verformungen (rechts)

Tabelle 6: Ergebnisbericht Probekörperherstellung für Biegezugversuche

	Wachs + Wachsart + Füllstoffgehalt	On- Set aus DSC [°C]	Temperatur beim		Beobachtungen
			Gießen: Form [°C]	Pressen: Form & Wachs [°C]	
1	PW 3119 Montanwachs	66,5	85°	Nicht gepresst	 <p>Abbildung 6-4: Eingesunkene Oberseite PW 3119</p> <p>Durch Gießen sehr gleichmäßige Probekörper, nur leicht eingesunken</p>
2	PW 3139 Montanwachs	20 – 100 linear	100°	Zusätzl. gepresst 100	 <p>Abbildung 6-5: Risse am gepressten Probekörper PW 3139</p> <p>Schmelzen dauert sehr lange, Barren gut aus der Form lösbar - durch Gießen gute Form der Probekörper (leicht eingesunken), an der Oberfläche teilweise Luftbläschen - durch Pressen starke Rissbildung</p>
3	PW 3146 Montanwachs 40% Füllstoffe	46,7	80°	Nicht gepresst	Klebt etwas in der Form - durch Gießen sehr gleichmäßige Probekörper, nur sehr leicht eingesunken



	Wachs + Wachsart + Füllstoffgehalt	On- Set aus DSC [°C]	Temperatur beim		Beobachtungen
			Gießen: Form [°C]	Pressen: Form & Wachs [°C]	
4	RC 253 Montanwachs 25% Füllstoffe	40,1	80°	Nicht gepresst	 <p>Abbildung 6-6: Absplitterungen durch das Herauslösen aus der Form, RC 253</p> <p>Nach dem Gießen verklebt die Gussform trotz Silikonspray stark, sie lässt sich nur mit Gewalt auseinander nehmen, dabei zerbrechen die Barren, Backpapier hilft - durch Gießen gleichmäßige Probekörper (nur leicht eingesunken), Absplitterungen wegen der Schwierigkeiten beim Herauslösen</p>
5	RC 252 Montanwachs 40% Füllstoffe	37	85°	Nicht gepresst	durch Gießen sehr gleichmäßige Probekörper, nur sehr leicht eingesunken
6	SSW 3 FT-Wachs	70,7	80	Zusätzl. gepresst 80	 <p>Abbildung 6-7: Unregelmäßige Form des gegossenen Probekörpers, SSW 3</p> <p>Spröde und ölig, bildet beim Abkühlen einen Film, der sich trotz Trennmittel nicht gut ablösen lässt, beim Pressen quillt viel Material aus der Form - gegossene Probekörper unregelmäßig in der Form (stark eingesunken) - gepresste Probekörper mit Risse</p>
7	VOE 6548 Montanwachs	36 & 94	80°	Zusätzl. gepresst 95	Sehr viel Dampfentwicklung beim Schmelzen, Druckaufbau beim Pressen nicht möglich, Material quillt aus der Form - gegossene Probekörper unregelmäßig in der Form (eingesunken) - gepresste Probekörper mit Rissen

	Wachs + Wachsart + Füllstoffgehalt	On- Set aus DSC [°C]	Temperatur beim		Beobachtungen
			Gießen: Form [°C]	Pressen: Form & Wachs [°C]	
8	CFW Paraffin	41,3	50°	Zusätzl. gepresst  50°	Beim Pressen quillt etwas Material aus der Form - durch Gießen gleichmäßige Probekörper, nur leicht eingesunken - nach Pressen keine Schädigung an der Oberfläche erkennbar  Siehe Abbildung 2.2-1
9	PC	20 – 94 linear	100°	Nicht gepresst	 <p>Abbildung 6-8: Absplitterungen am Probekörper PC</p> <p>Gegossene Probekörper mit gleichmäßiger Form, aber Absplitterungen an der Oberfläche</p>

Bei der Probekörperherstellung hat sich gezeigt, dass sehr langsames Herunterkühlen (bzw. Tempern) bei vielen der untersuchten Wachse ausreichend ist, um einen einigermaßen gleichmäßigen Probekörper zu gießen. Besonders beim Wachs CFW konnten mit dieser Methode des Umformen durch Pressen sehr maßhaltige Probekörper hergestellt werden. Bei allen anderen gepressten Wachsen wurden die Probekörper zwar maßhaltiger, wiesen aber Rissbildungen auf.

## Versuchsprotokoll:

Titel:	Verbindungs- und Verankerungsmittel im Wachs
Thema:	Non Waste Wachsschalungen DFG
Versuchsnummer:	ITE_150318
Datum:	18.03.2015
Bearbeiter:	Jeldrik Mainka

### 1. Ziel des Versuchs / Erwartete Ergebnisse:

Ziel dieses begleitenden Versuches ist es, grundlegende Erkenntnisse zu auf dem Markt erhältlichen Verbindungsmitteln (Schrauben) im Hinblick auf die Verbindung/Verzahnung im Wachs und deren Zugtragfähigkeit zu gewinnen. Verbindungsmittel werden dafür benötigt, um u.a. das Wachs bzw. die Wachsschalungen z.B. auf Trägerplatten zu verankern oder mit hölzernen Furniersperrholzschalplatten als Randabschalungen zu kombinieren. Zudem kann es ggf. notwendig sein, einzelne Wachsschalungen untereinander zu verbinden.

Basierend auf den theoretischen Überlegungen wird erwartet, dass besonders Schrauben aus dem Holzbau mit hohen Gewindesteigungen, (hoher Zahnabstand), dünnem Schaftdurchmesser und breitem Gewinde eine höhere Tragfähigkeit aufweisen, als z.B. Schrauben mit metrischem feinen Gewinde (z.B. Maschinenbauschrauben)

### 2. Materialien und Grundlagen

- Kranwaage (digital/analog)
- Kettenzug (kleinschrittig manuell verfahrbar)
- Verbindungselement um Schraubenköpfe mit Kranwaage zu verbinden
- Wachsblock aus ConFormWax CFW der Wachs- & Ceresin-Fabriken Th. C. Tromm GmbH Köln, Abmessungen: 300 x 300 mm, Höhe 100 mm plangefräst
- Ankerschrauben und Stahljoche, um die Wachsprobe auf dem Boden zu fixieren
- Akku-Schrauber, Bohrer mit diversen Durchmessern
- Eine geeignete und repräsentative Schraubenauswahl der am Markt verfügbaren Schraubentypen gemäß Abbildung 2-1, Abbildung 2-2, Abbildung 2-3 und Tabelle 1



Abbildung 2-1: Rampa-Muffen Typ SKL: #1 Außendurchmesser (AD) 12 mm, #2 AD 13,8 mm, #3 AD 18,3 mm, #4 AD 21,9 mm (v.l.n.r.)



Abbildung 2-2: Holzschrauben: #5 AD 3,8 mm, #6 AD 6 mm, #7 AD 8 mm, #8 AD 7 mm, #9 AD 9 mm (v.l.n.r.)

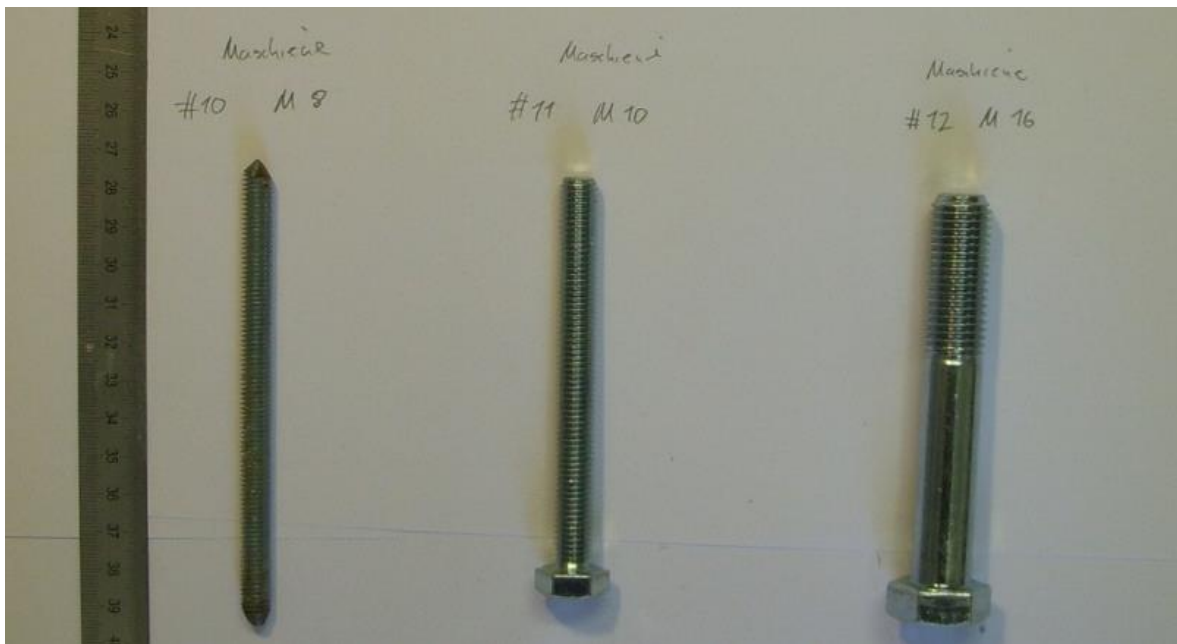


Abbildung 2-3: Metrische ISO-Gewinde (DIN 13): #10 M 8 mm, #11 M 10 mm, #12 M 16 mm (v.l.n.r.)

### 3. Versuchsaufbau und Durchführung

Der Kettenzug wird an einem Stahlträger der Versuchshalle aufgehängt. Die Wachsblöcke werden mit Stahljochen und Ankerschrauben auf dem Hallenboden fixiert.

Bei Vorversuchen hat sich gezeigt, dass es beim Einschrauben unterschiedlicher Schraubentypen ohne Vorbohren in das verwendete CFW Wachs zu lokalen Abplatzungen bzw. zu einem Aufreißen des Wachsblockes kommt. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass das verwendete Wachs nicht elastisch /kompressibel genug bzw. zu spröde ist und eine relativ geringe Zugfestigkeit besitzt, so dass es nicht in der Lage ist, sich z.B. wie Holz entsprechend lokal zu verdichten, um dem Schraubenvolumen entsprechend Raum im Material zu geben. In den Vorversuchen wurde daher untersucht, mit welchem jeweiligen minimalen Durchmesser die Wachsblöcke vorgebohrt werden müssen, damit es beim Eindrehen der Schrauben nicht zu Abplatzungen bzw. zu einem Aufreißen des Wachsblockes kommt. Die jeweils empfohlenen Durchmesser zum Vorbohren sind in Tabelle 1 – Spalte Vorbohrung dargestellt und

liegt vornehmlich jeweils etwas unterhalb des Flankendurchmesser bzw. des Mittelwerts zwischen Außen- und Kerndurchmesser.

Nach dem Vorbohren werden die jeweiligen Schrauben 30 mm tief in den Versuchskörper aus CFW Wachs maschinell eingeschraubt, auch wenn die Länge des Schaftes wie bei Rampa Muffe #1, #2 und #3 eigentlich kürzer ist. Die Tiefe von 30 mm stellt dabei die gewählte maximale Stärke der Verankerungsebene im Wachs dar, sodass auch Schrauben mit längeren Schäften nicht tiefer in das Wachs eingeschraubt werden. Beim Eindrehen der Rampa-Muffen hat sich gezeigt, dass ein leichtes Vorwärmen der Oberfläche des Wachses um die Vorbohrung herum kleine Abplatzungen an der Oberfläche verhindert.

Nach dem Eindrehen werden die Schraubenköpfe bzw. Gewindestangen, welche aus dem Wachs herausstehen, über eine Augenmutter mit der Kranwaage und dem Kettenzug verbunden. Anschließend wird der Kettenzug langsam manuell verkürzt, bis die Schraube aus dem Wachs ausreißt oder das Wachs selbst aufreißt. Die Versuche wurden jeweils bei 20° C durchgeführt. Die maximale aufgebrachte Zugkraft entspricht somit dem Auszugswiderstand der jeweiligen Schraube und wird über den Schleppzeiger der Kranwaage angezeigt und notiert. Pro Schraubentyp werden mind. 3 Versuche durchgeführt.

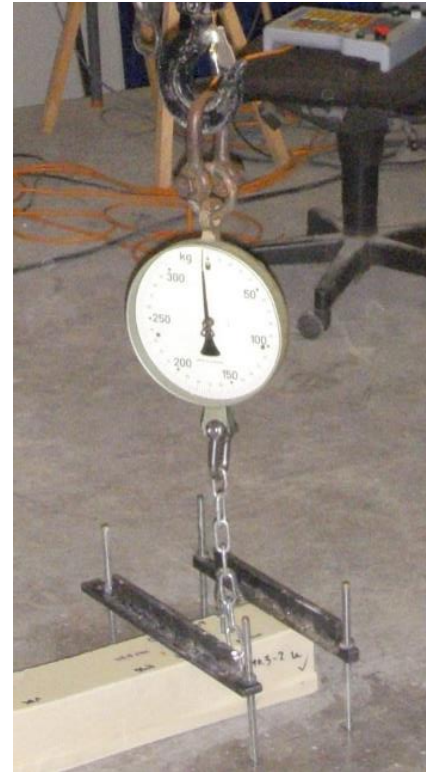


Abbildung 3-1: Versuchsaufbau

#### 4. Ergebnisbeschreibung

Tabelle 1: Relevante Maße und Maßverhältnisse der jeweiligen Schrauben, die empfohlenen Durchmesser zum Vorbohren und die ermittelte Auszugskraft

Nr.	Schrauben- typ	Kern- bzw. Schaftdurch- messer d1 [mm]	Außen- durch- messer d [mm]	Ver- hältniss d/d1	Steigung P [mm]	Länge Schaft l [mm]	Flankendurch- messer d2 bzw. Mittelwert d und d1 [mm]	Vor- bohrungs- durch- messer d [mm]	Auszugs- kraft Fz [N] (Mittelwert)	Verhältnis Fz/(l x d)
# 1	Rampa-Muffe (Innengew. M6)	9,45	12,00	1,27	2,40	15,0	10,73	10,5	1400	7,78
# 2	Rampa-Muffe (Innengew. M8)	11,30	13,80	1,22	3,50	17,9	12,55	12,0	1810	7,33
# 3	Rampa-Muffe (Innengew. M10)	15,40	18,30	1,19	4,00	20,1	16,85	16,5	2400	6,52
# 4	Rampa-Muffe (Innengew. M12)	19,00	21,90	1,15	4,00	30,0	20,45	20,0	2800	4,26
# 5	Holzschraube	2,50	3,80	1,52	2,00	30,0	3,15	3,0	750	6,58
# 6	Holzschraube	3,75	6,00	1,60	3,00	30,0	4,88	4,0	1600	8,89
# 7	Holzschraube	5,40	8,00	1,48	5,50	30,0	6,70	6,0	1900	7,92
# 8	Stockschraube	5,40	7,00	1,30	2,80	30,0	6,20	6,0	1500	7,14
# 9	Stockschraube	7,40	9,00	1,22	3,30	30,0	8,20	8,0	1800	6,67
# 10	ISO-Gewinde M8	6,47	8,00	1,24	1,25	30,0	7,24	6,8*	Eindrehen nicht möglich	
# 11	ISO-Gewinde M10	8,16	10,00	1,23	1,50	30,0	9,08	8,5*	Eindrehen nicht möglich	
# 12	ISO-Gewinde M12	9,85	12,00	1,22	1,75	30,0	10,93	10,0*	Eindrehen nicht möglich	



Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, können die Rampa-Muffen (Nr. #1 bis #4) im Mittel jeweils Kräfte von 1,4 kN bis 2,8 kN, die Holzschrauben jeweils 0,7 kN bis 1,9 kN und die Stockschrauben jeweils 1,5 kN bzw. 1,8 kN bei einer Einschraubtiefe von 30 mm aufnehmen. Die ISO-Gewinde Maschinenschrauben ließen sich trotz Vorbohren mit einem aus gemäß Literatur empfohlenen Durchmesser nicht in das CFW Wachs eindrehen und konnten daher nicht geprüft werden. Alle geprüften Schrauben, bis auf Rampa-Muffe Nr. #3, zeigten als Versagensart ein Schubversagen des Wachses bzw. ein Abscheren der Wachsflanken an der Außenseite des Gewindes der Schrauben, wie in Abbildung 4-1 dargestellt.

Die Rampa-Muffe Nr. #3 zeigte hingegen als Versagensart ein Zugversagen des Wachses (Schüsselartiger Ausbruchkegel des Wachses), wie in Abbildung 4-2 dargestellt.

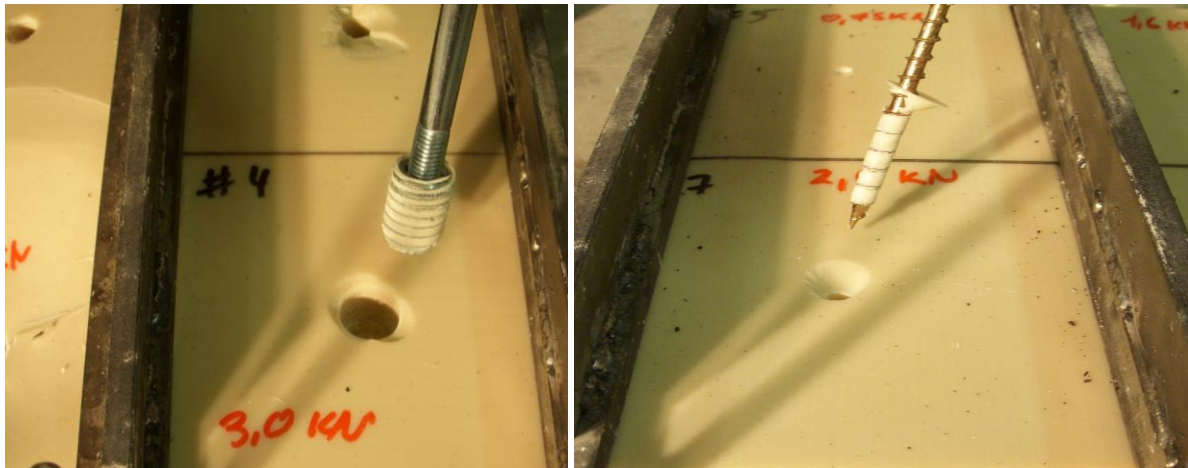


Abbildung 4-1: Versagensart Schubversagen (Abscheren der Wachsflanken) hier am Beispiel Rampa Muffe Nr. #4 (links) und Holzschraube #7



Abbildung 4-2: Versagensart Zugversagen Wachs (Schüsselartiger Ausbruchkegel des Wachses) hier am Beispiel Rampa Muffe Nr. #3

## 5. Auswertung und Resümee

Um die Versuchsergebnisse abschließend bewerten zu können, wurde die maximale Auszugskraft bzw. der Auszugswiderstand der Schrauben durch das Produkt aus Einschraublänge und Durchmesser geteilt. Das hieraus resultierende Verhältnis zeigt die normierte Leistungsfähigkeit der einzelnen Verbindungsmittel zueinander. Die maximalen Auszugskräfte, sowie das Verhältnis  $F_z/(l \times \varnothing)$  der einzelnen Verbindungsmittel ist in Tabelle 1 dargestellt. Zudem wurde das Verhältnis Außendurchmesser  $d$  zu Schaftdurchmesser  $d_1$  der Schrauben gebildet, um eine Aussage über den Einfluss der Gewindegröße bewerten zu können. Hierbei zeigt sich bei der Rampa-Muffe #1 und bei der Holzschraube #6 die höchste Leistungsfähigkeit und jeweils auch das größte Verhältnis  $d/d_1$ .

Hieraus lässt sich ableiten, dass für eine hohe Zugtragfähigkeit von Schrauben in CFW Wachs die folgenden Kriterien erfüllt sein sollten:

- Möglichst großer Außendurchmesser
- Möglichst großes Verhältnis zwischen Außendurchmesser zu Schaftdurchmesser
- Möglichst große Gewindesteigung

Obwohl die kleineren Schrauben die höchste Leistungsfähigkeit aufwiesen, sollten für die Wachsschalungen aus praktischen Gründen zur Begrenzung des Aufwandes prinzipiell eher größere und dafür weniger Schrauben verwendet werden. Für die Rampa-Muffe wird daher empfohlen #3 zu verwenden, da diese eine hohe Leistungsfähigkeit und gleichzeitig einen hohen absoluten Auszugswiderstand von 2,4 kN aufzeigt. Zudem wird bei dieser Rampa-Muffe #3 anhand des Zugversagens des Wachses deutlich, dass sie zusammen mit dem empfohlenen Vorbohrdurchmesser von 16,5 mm eine sehr gutes Verbundverhalten mit dem Wachs zeigt. Für die Holzschrauben wird #7 empfohlen, da diese ebenfalls einen hohen absoluten Auszugswiderstand von 1,9 kN aufzeigt und sich mit dem empfohlenen Vorbohrdurchmesser von 6 mm sehr gut vorbohren lässt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, das Holzverbindungsmittel bzw. -schrauben generell gut bis sehr gut für Wachs geeignet sind, wenn diese in vorgebohrte Löcher eingedreht werden. Da diese Versuchsreihe lediglich eine Einschraubtiefe von 30mm berücksichtigt und die Prüfgeschwindigkeit nicht eindeutig bestimmt werden konnte, sind diese Vorversuche eher als Grundlagenversuche mit Empfehlungscharakter zu verstehen. Es wird daher empfohlen, besonders die Verbindungsmittel #3 und #7 sowie eine weitere Anzahl von Verbindungsmittel aus dem Holzbau (nach den empfohlenen Kriterien) an einer genormten Zugprüfmaschine mit langsamen Prüfgeschwindigkeiten oder unter Dauerbelastung zu prüfen.

# Formenbausteinkatalog

Zur Verifizierung der geometrischen Potentiale der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie wurden zwei digitale CAD Modelle als Schaltafeln (Block A und B) aus einzelnen „Formenbausteinen“, Referenzgeometrien genannt, zusammengesetzt. Zur geometrischen Nachvollziehbarkeit der zum Teil äußerst komplexen Formenbausteine werden diese im Folgenden anhand von Ansichten und Zeichnungen beschrieben.

## Definition Wachsschaltafel Block A

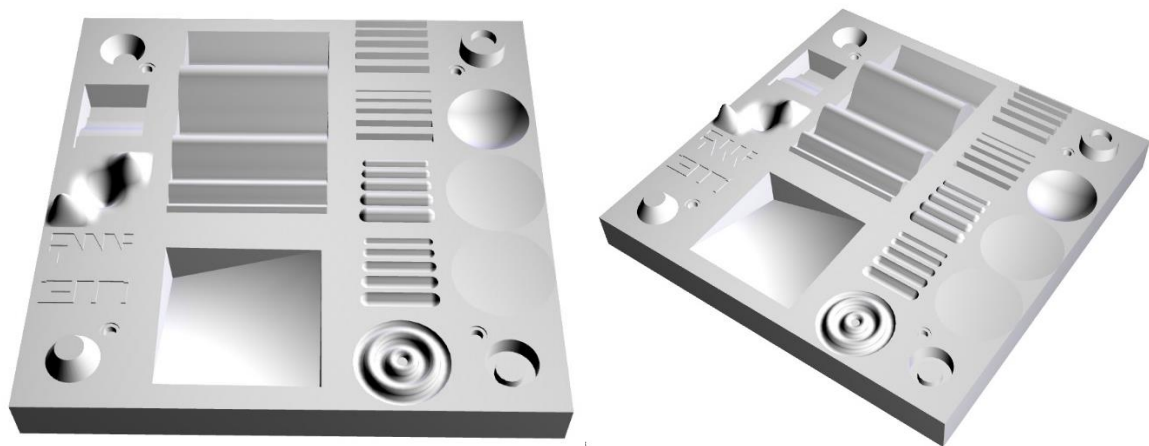
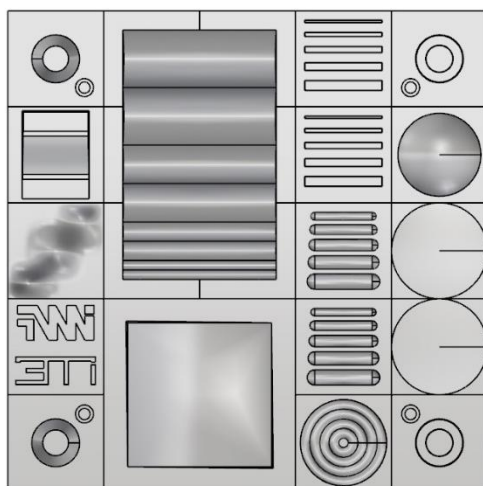


Abbildung 1: Digitale CAD Modelle der Wachsschaltafel Block A Perspektivische Ansicht als Bildsynthese, welche aus unterschiedlichen Formenbausteinen zusammengesetzt ist



2.10	4.1	1.1	2.3
9.2		1.2	5.6
7.2		1.5	5.4
8.3	6.10	1.6	5.2
2.9		1.7	2.4

Abbildung 2: Digitales CAD Modell der Wachsschaltafel Block A Aufsicht (links), Nummerierung und Position der verwendeten Formenbausteine

## Definition Wachsschaltafel Block B

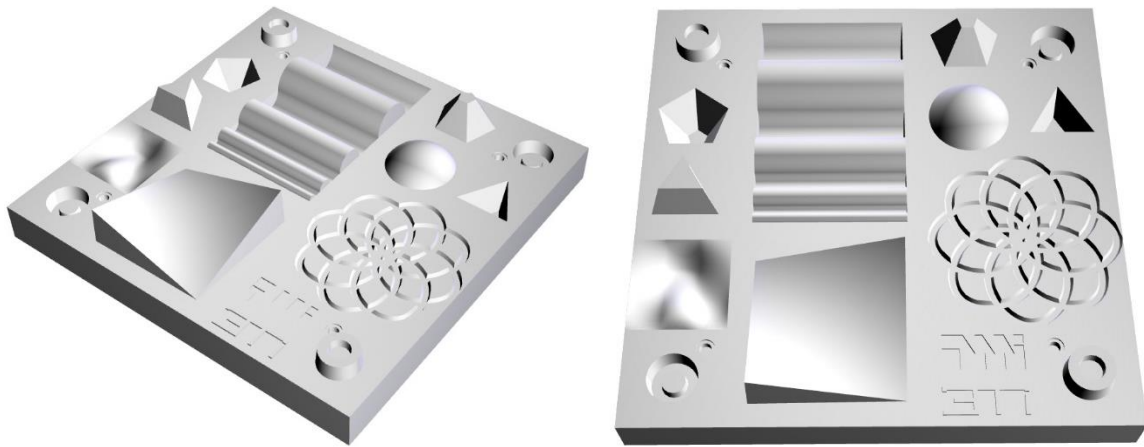
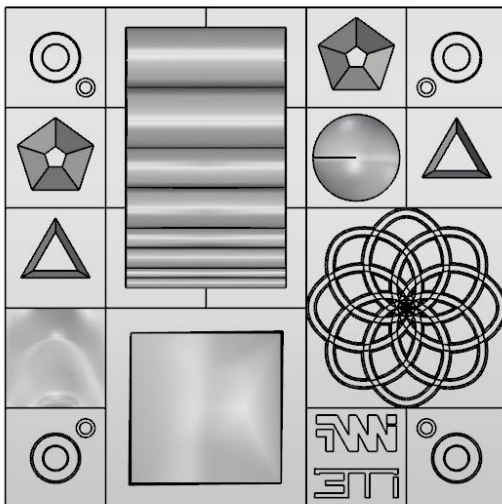


Abbildung 3: Digitales CAD Modell der Wachsschaltafeln Block B Perspektivische Ansicht als Bildsynthese, welche aus unterschiedlichen Formenbausteinen zusammengesetzt ist



2.5	4.2	3.19	2.6
3.20		5.5	3.14
3.13		12.3	
7.6	6.9		
2.8			

Abbildung 4: Digitales CAD Modell der Wachsschaltafel Block B Aufsicht (links), Nummerierung und Position der verwendeten Formenbausteine

## Allgemeine Erläuterungen:

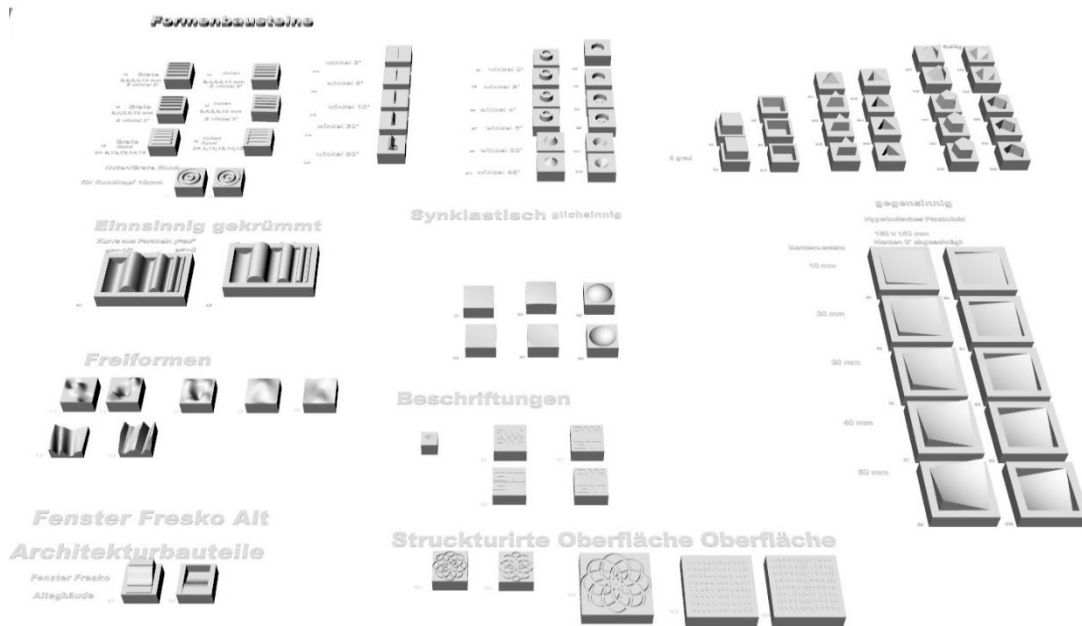


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung einer Vielzahl von Formenbausteinen, die mit dem Programm Rhinoceros 3D der Fa. McNeil konstruiert wurden

Die im Folgenden geometrisch beschriebenen 29 Formenbausteine wurden aus einer Vielzahl von konstruierten Formenbausteinen (Abbildung 5) in Abstimmung mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der Technischen Universität Braunschweig ausgewählt.

Alle dargestellten Maße sind in der Maßeinheit mm dargestellt.

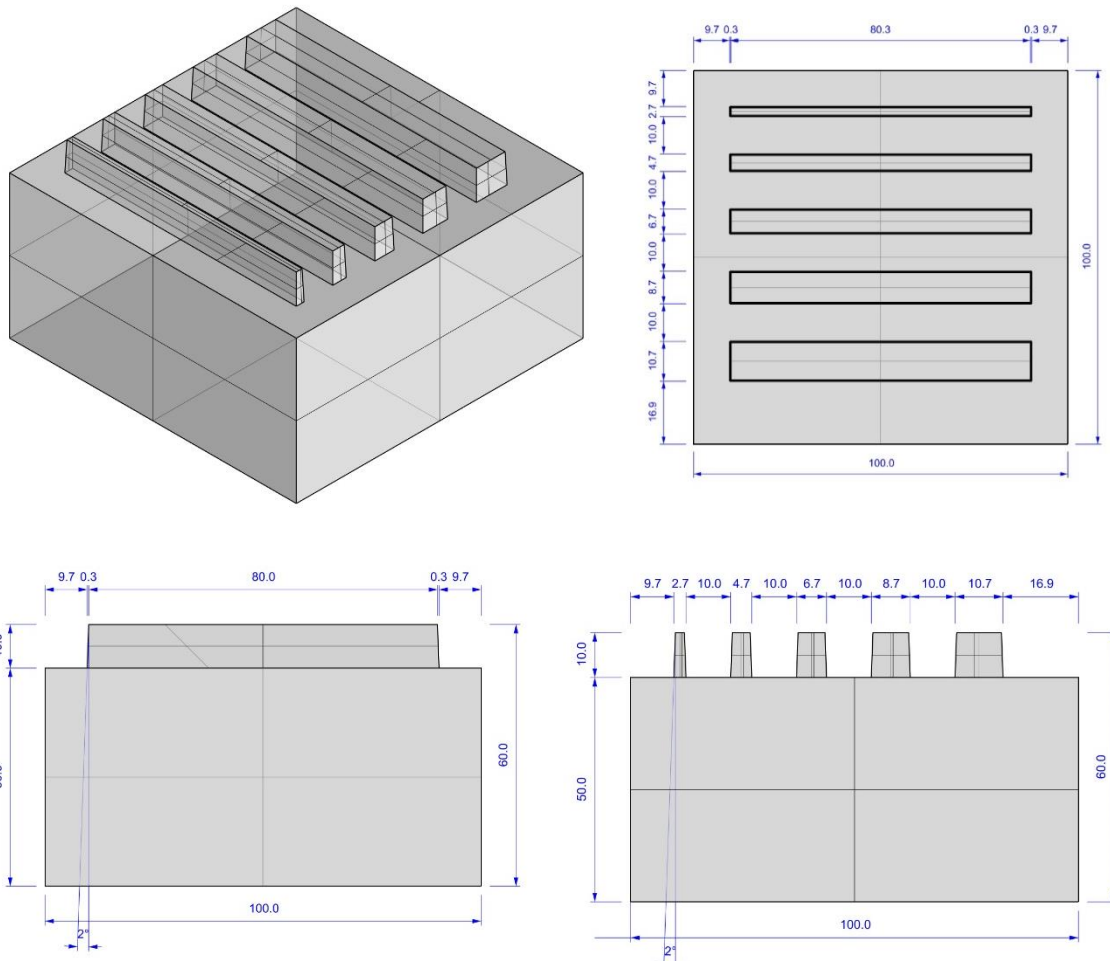
Die vorgestellte Bezeichnung „positiv“ bedeutet, dass die Geometrie aus der Referenzoberfläche heraussteht bzw. über ihr liegt und „negativ“, dass sie in diese hineinsteht bzw. unter ihr liegt.

Alle Formenbausteine werden dabei in der Reihenfolge: Perspektive, Aufsicht, Ansichten und ggf. Schnitte dargestellt.

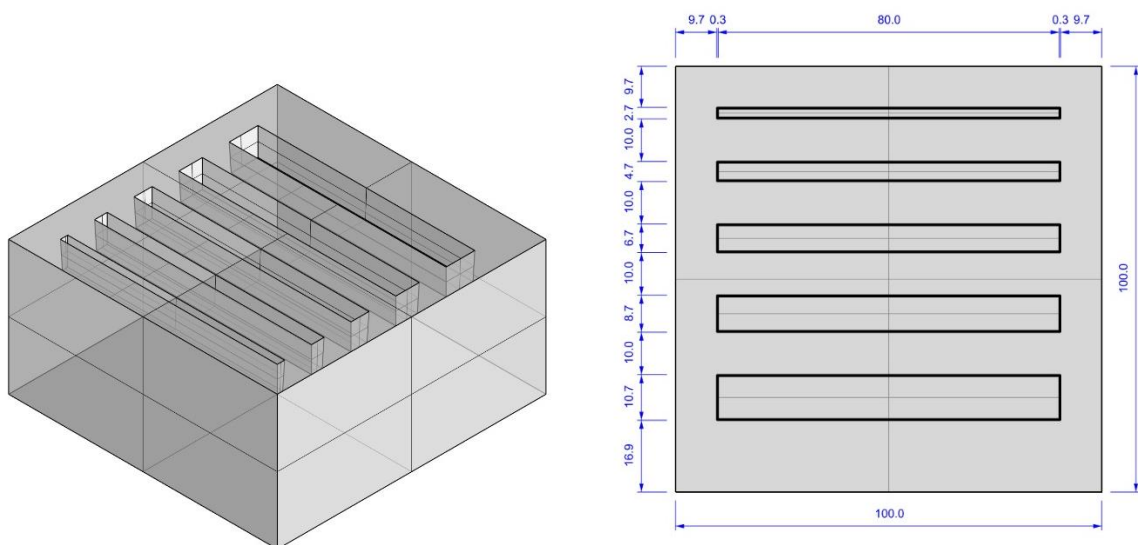
An den Formenbausteinen mit den Nr. 2.3, 2.4, 2.9 und 2.10 sind zusätzlich zylinderförmige Vertiefungen dargestellt, die vor der Betonierung abgedeckt werden und lediglich aus technischen Gründen beim Herstellungsprozess zur Unterstützung beim Ausschalen benötigt werden.

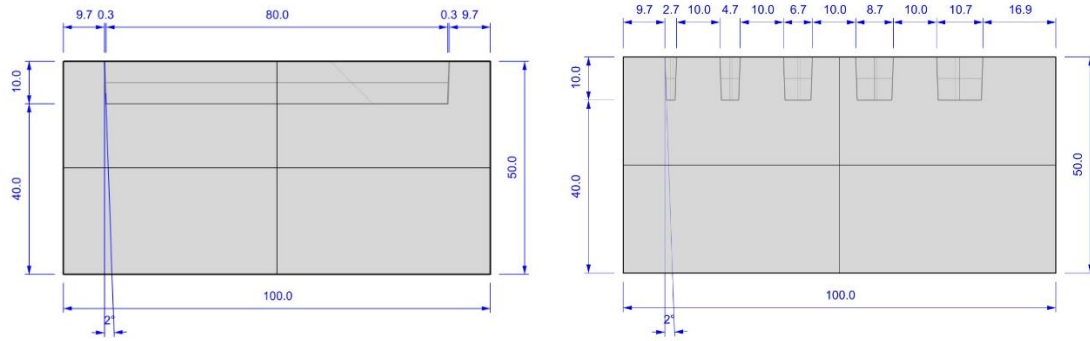


Formenbaustein Nr. 1.1 – Positive Stege mit unterschiedlichen Breiten und einem Entformungswinkel von 2°

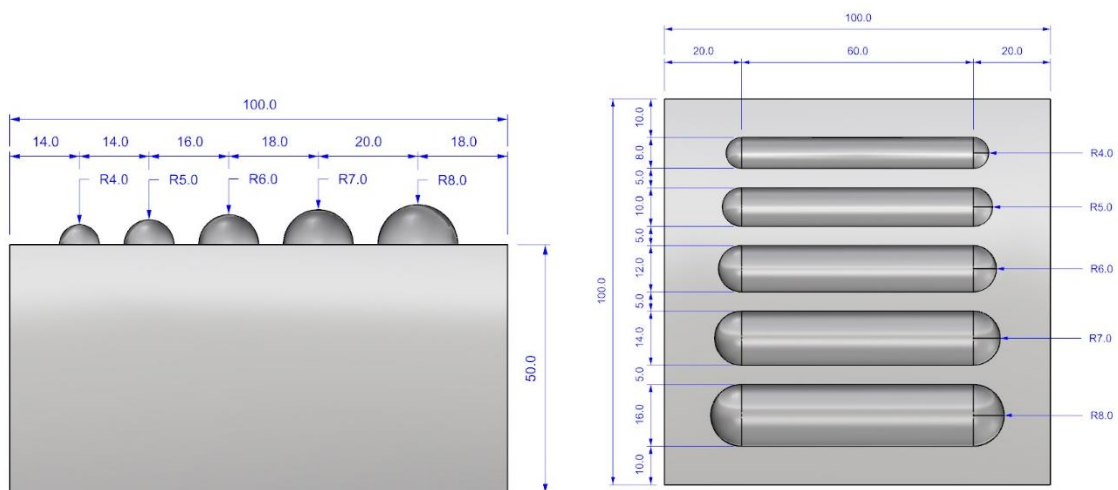
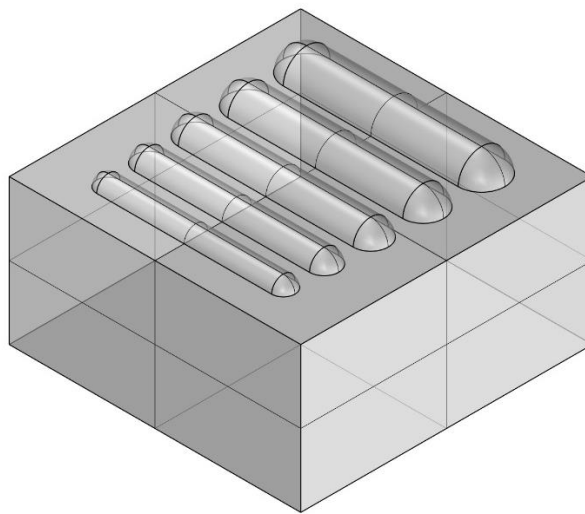


Formenbaustein Nr. 1.2 – Negative Nuten mit unterschiedlichen Breiten und einem Entformungswinkel von 2°

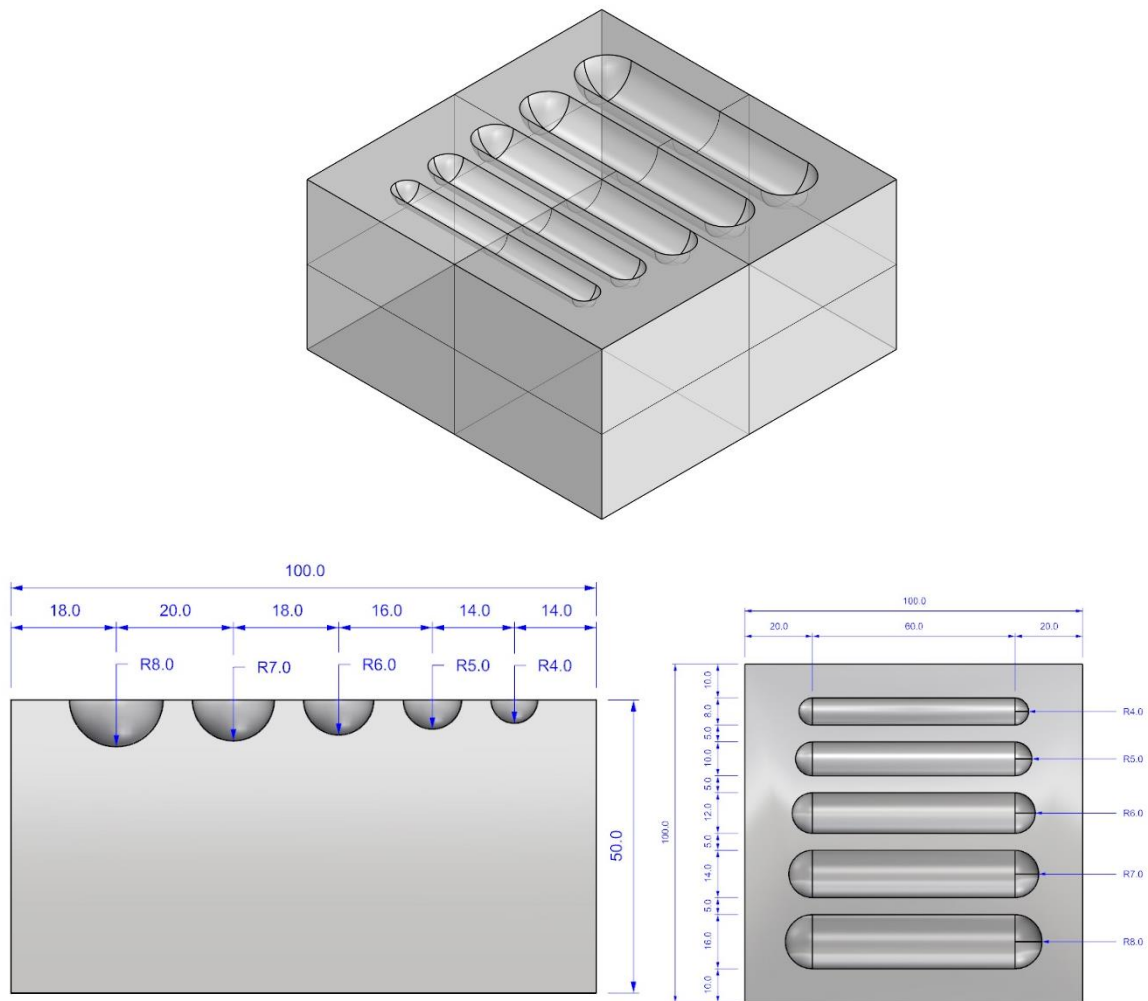




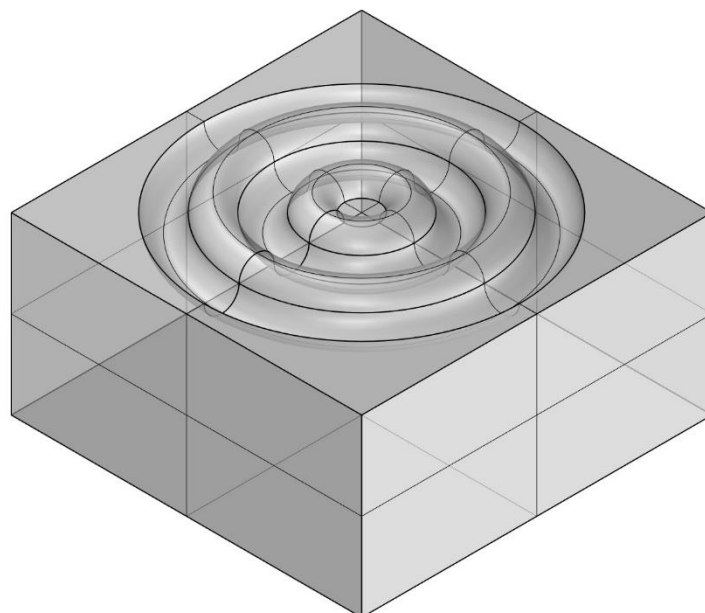
Formenbaustein Nr. 1.5 – Positive radial abgerundete Stege mit unterschiedlichen Breiten

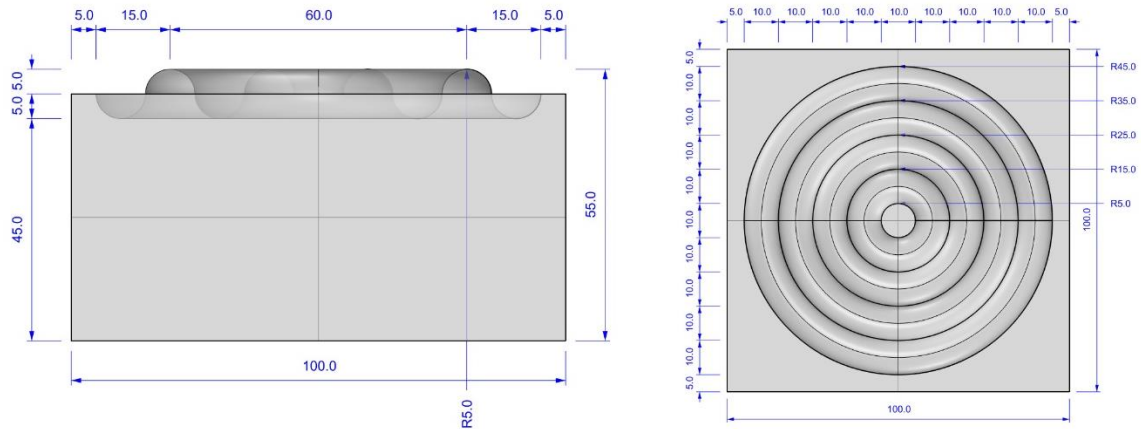


## Formenbaustein Nr. 1.6 – Negativ radial abgerundete Nuten mit unterschiedlichen Breiten

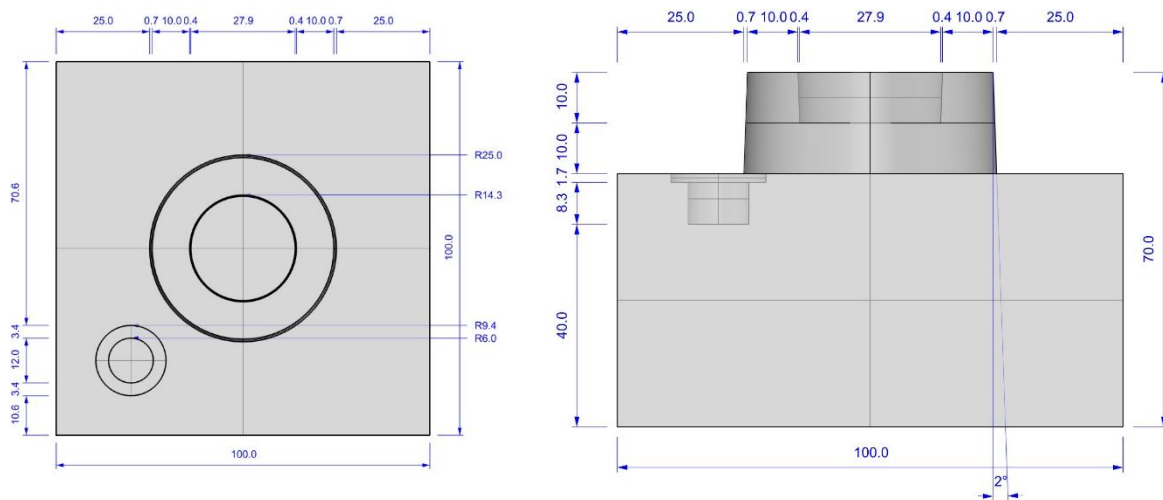
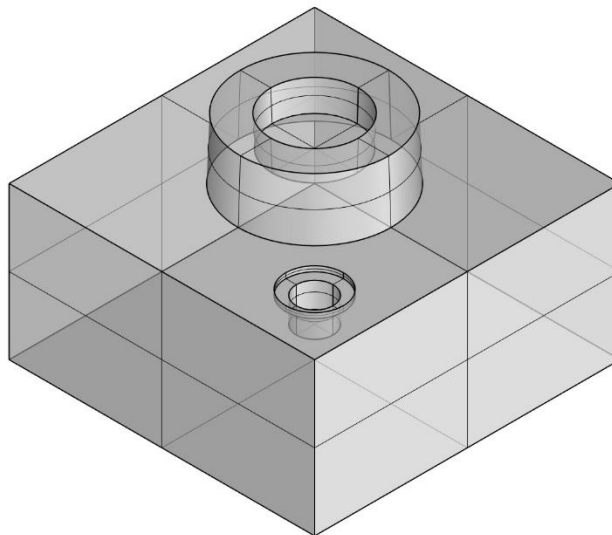


## Formenbaustein Nr. 1.7 – Positives und negatives radial abgerundetes Wellenprofil (Stege und Nuten)

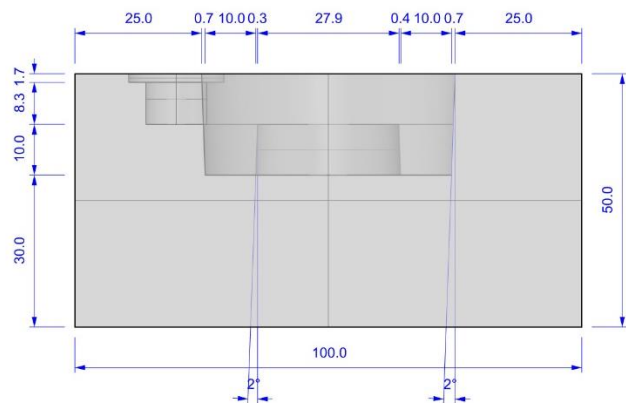
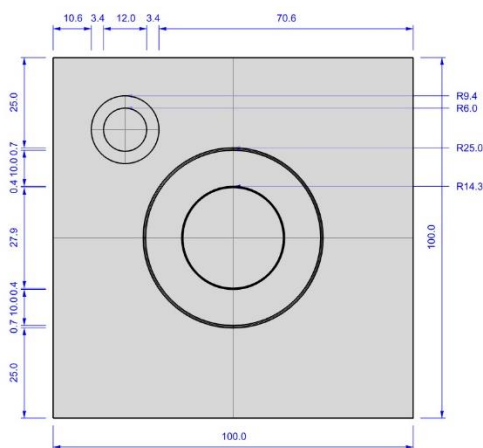
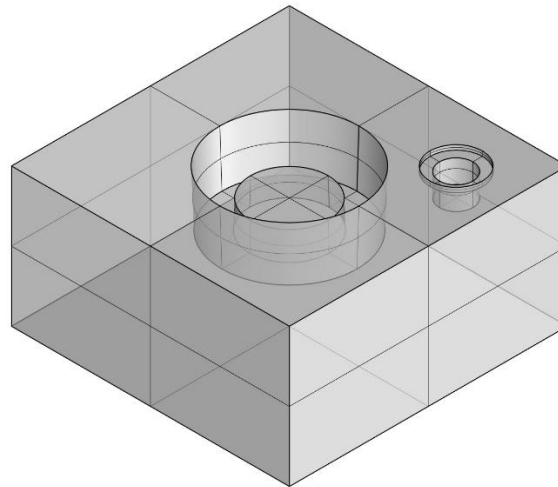




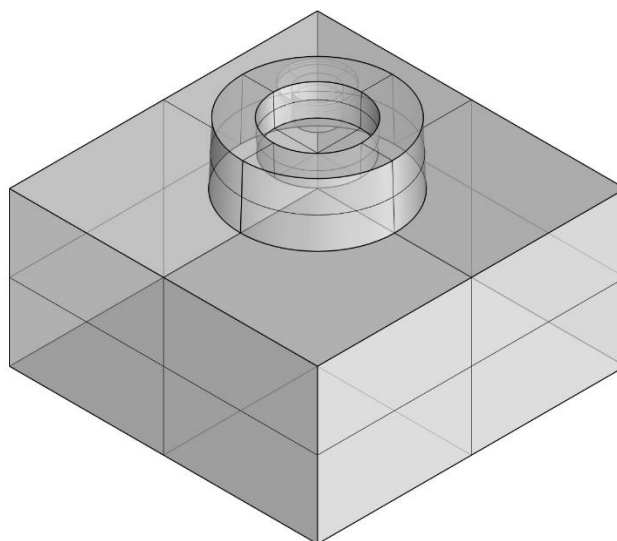
Formenbaustein Nr. 2.3 – Positiver Kegelstumpf (Typ 1) mit negativem Innenstumpf und einem Entformungswinkel von  $2^\circ$



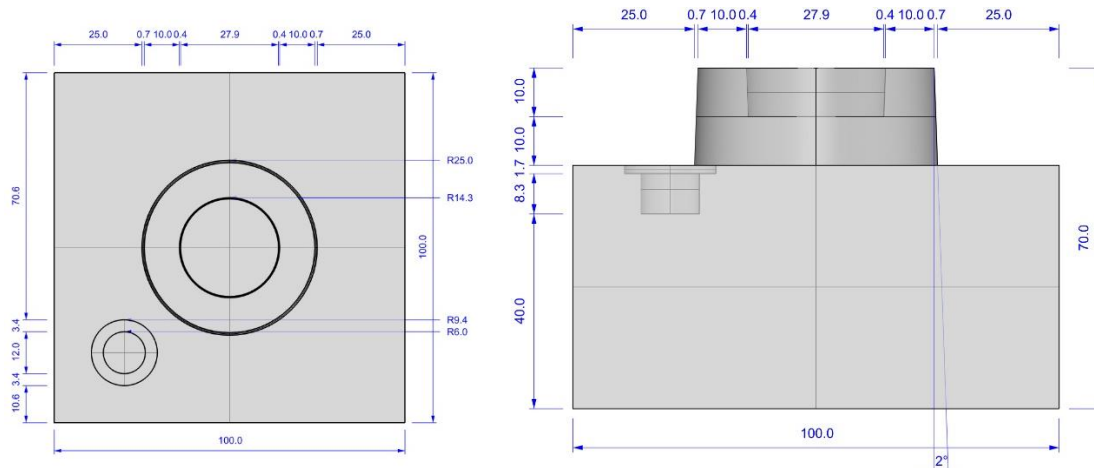
Formenbaustein Nr. 2.4 – Negativer Kegelstumpf (Typ 1) mit positivem Innenstumpf und einem Entformungswinkel von 2°



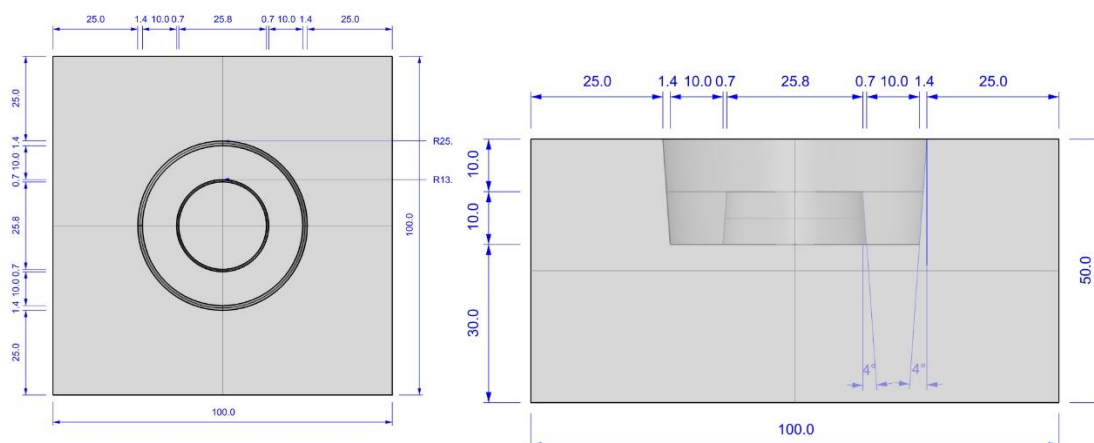
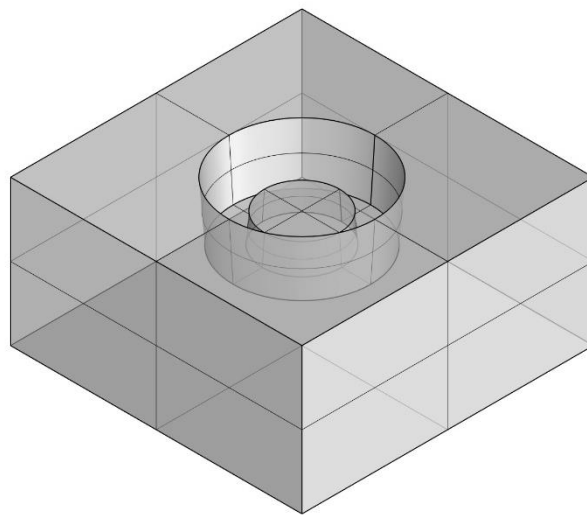
Formenbaustein Nr. 2.5 – Positiver Kegelstumpf (Typ 2) mit negativem Innenstumpf und einem Entformungswinkel von 2°



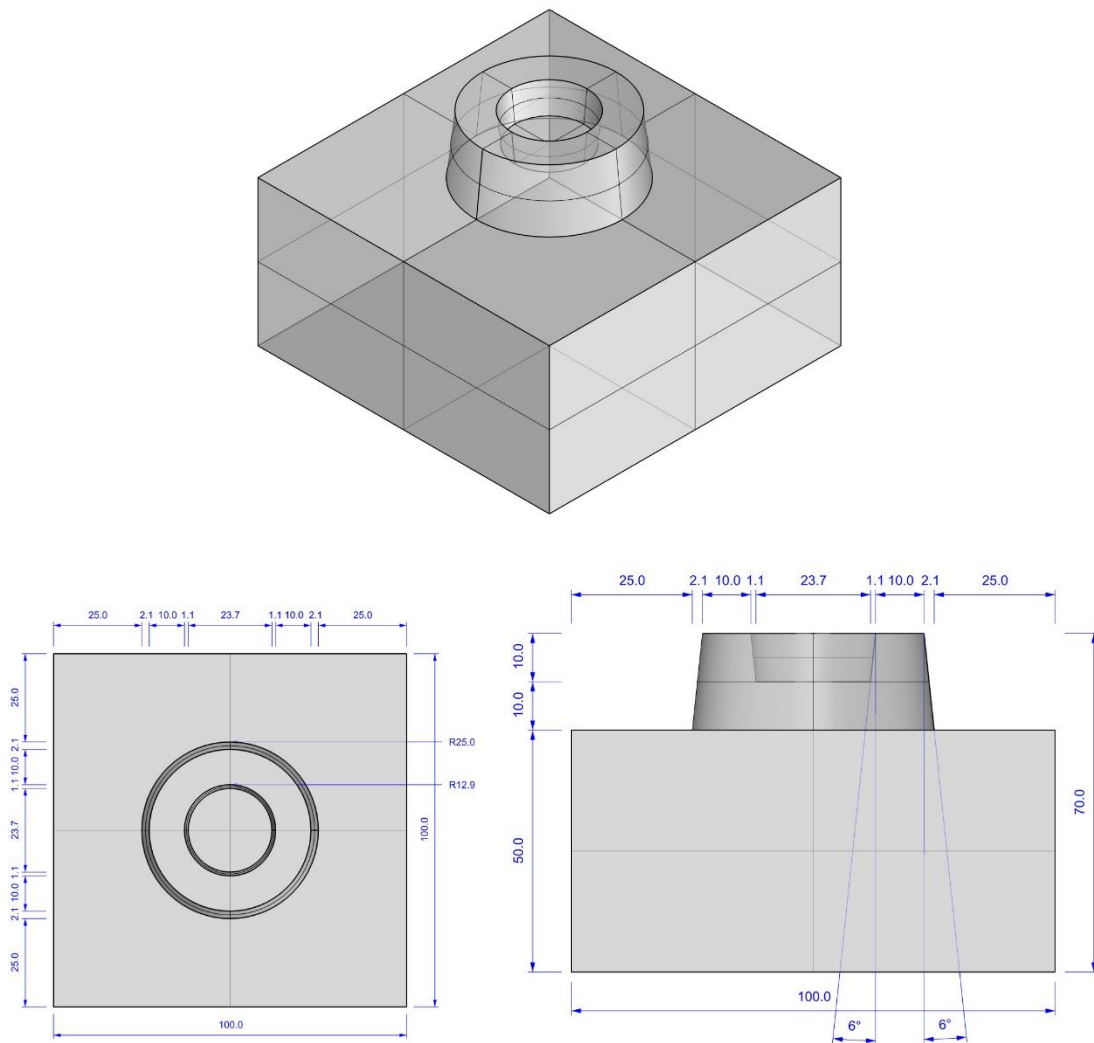




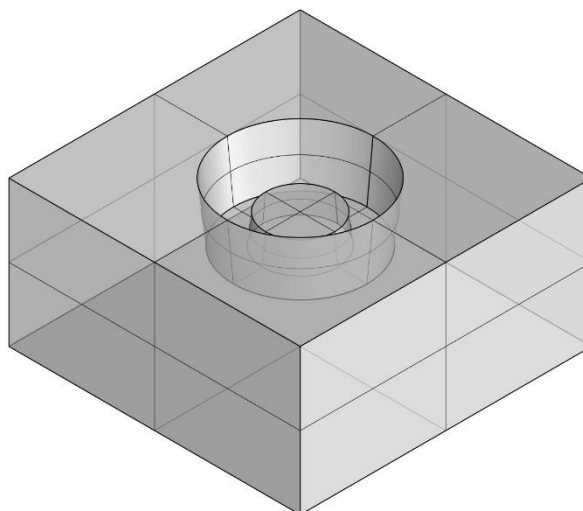
Formenbaustein Nr. 2.6 – Negativer Kegelstumpf (Typ 2) mit positivem Innenstumpf und einem Entformungswinkel von 2°

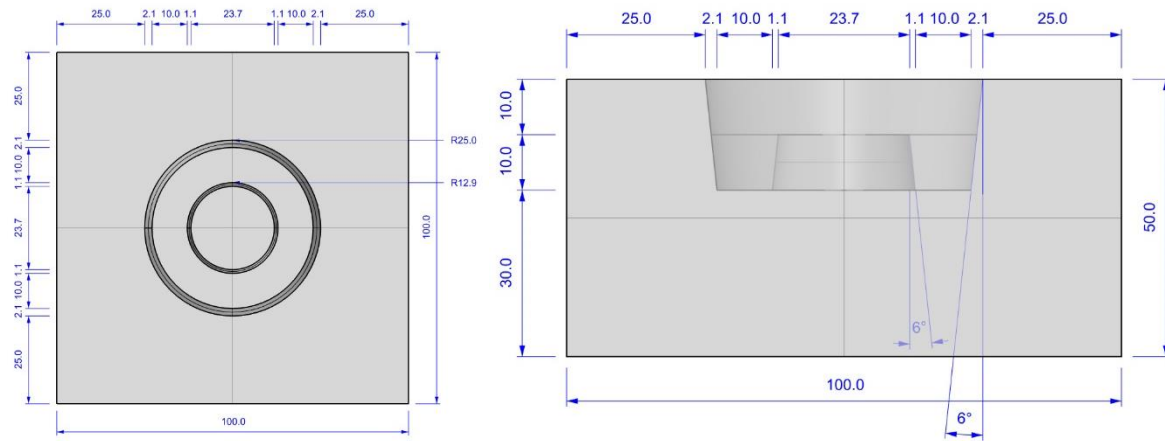


Formenbaustein Nr. 2.7 – Positiver Kegelstumpf (Typ 3) mit negativem Innenstumpf und einem Entformungswinkel von  $6^\circ$

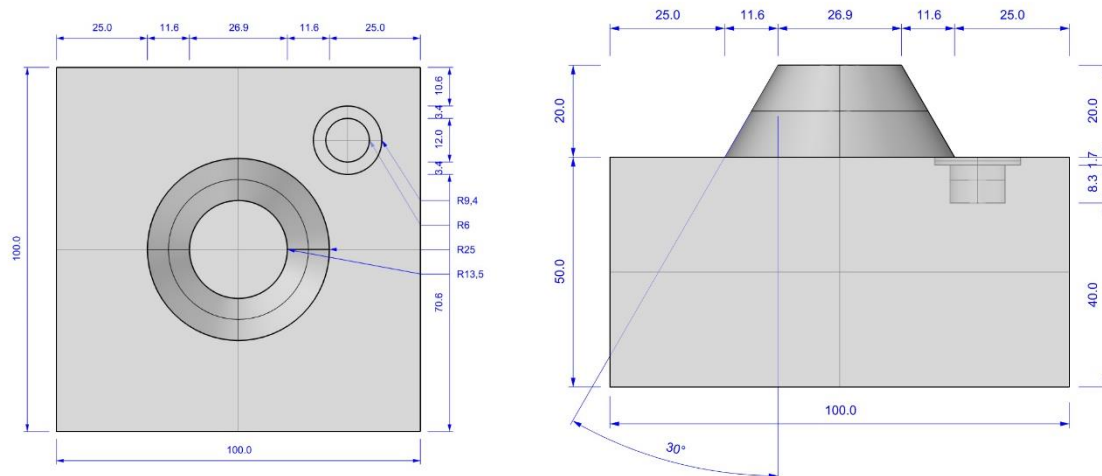
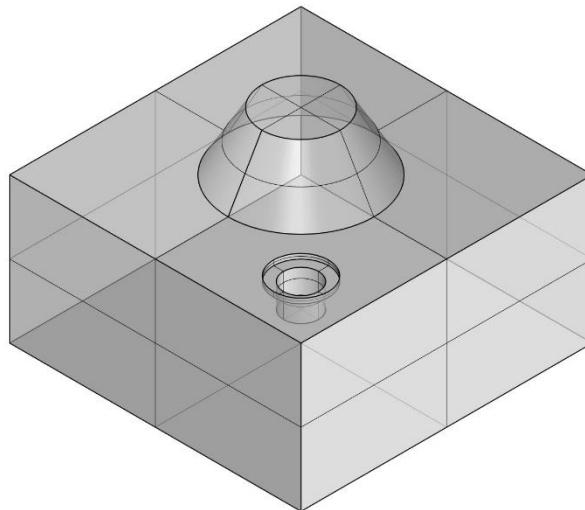


Formenbaustein Nr. 2.8 – Negativer Kegelstumpf (Typ 3) mit positivem Innenstumpf und einem Entformungswinkel von  $6^\circ$

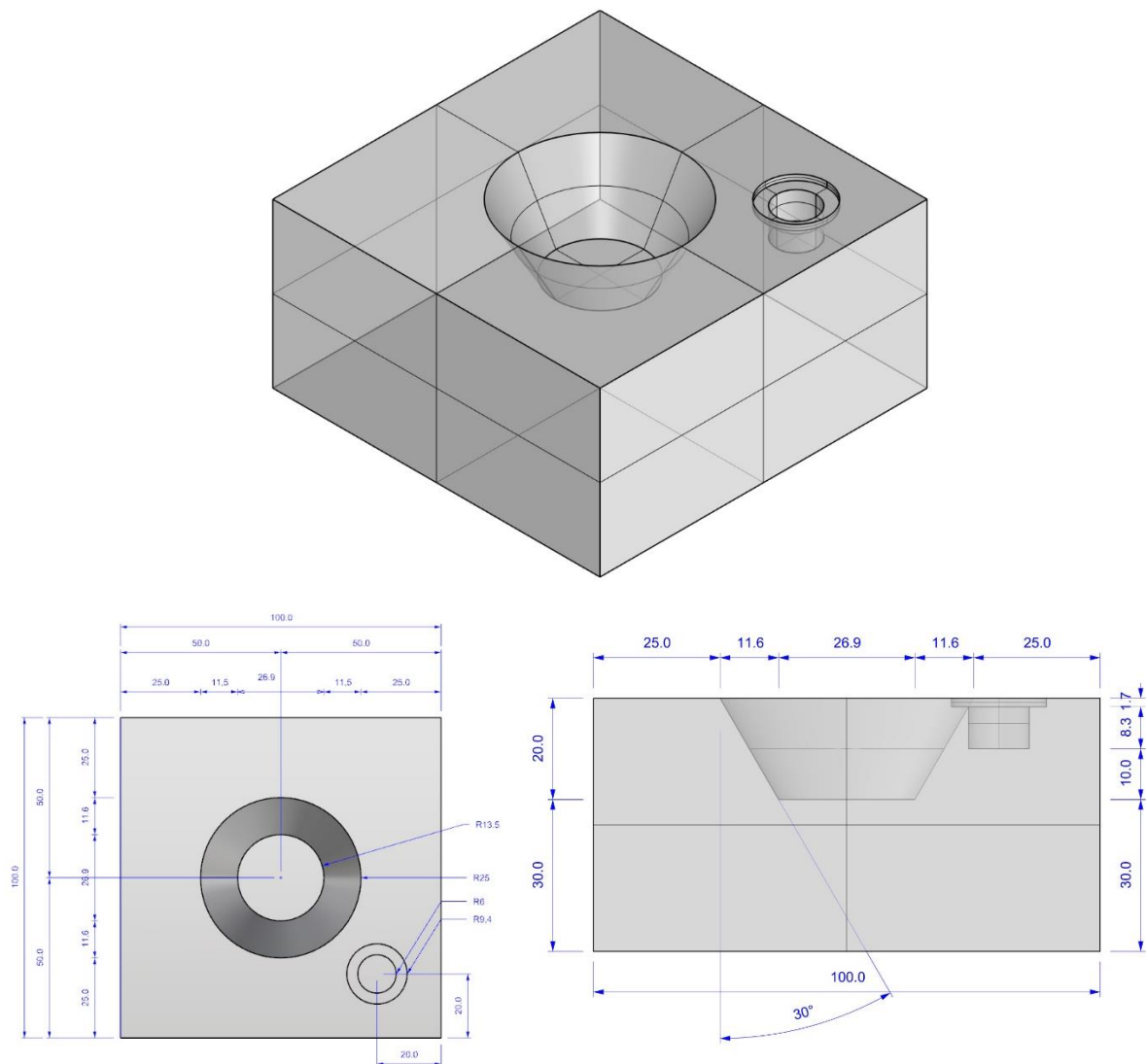




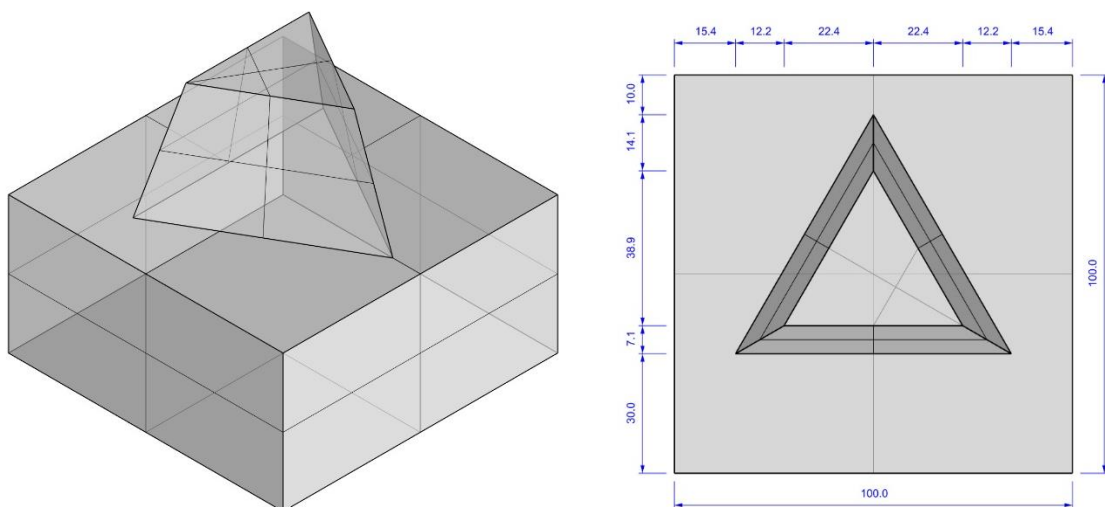
Formenbaustein Nr. 2.9 – Positiver Kegelstumpf mit Entformungswinkel von 30°

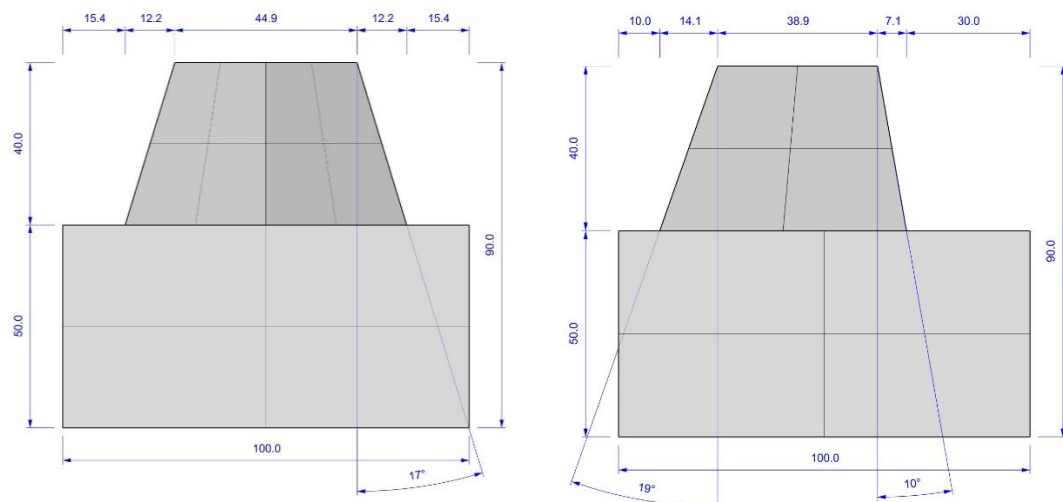


Formenbaustein Nr. 2.10 – Negativer Kegelstumpf mit Entformungswinkel von 30°

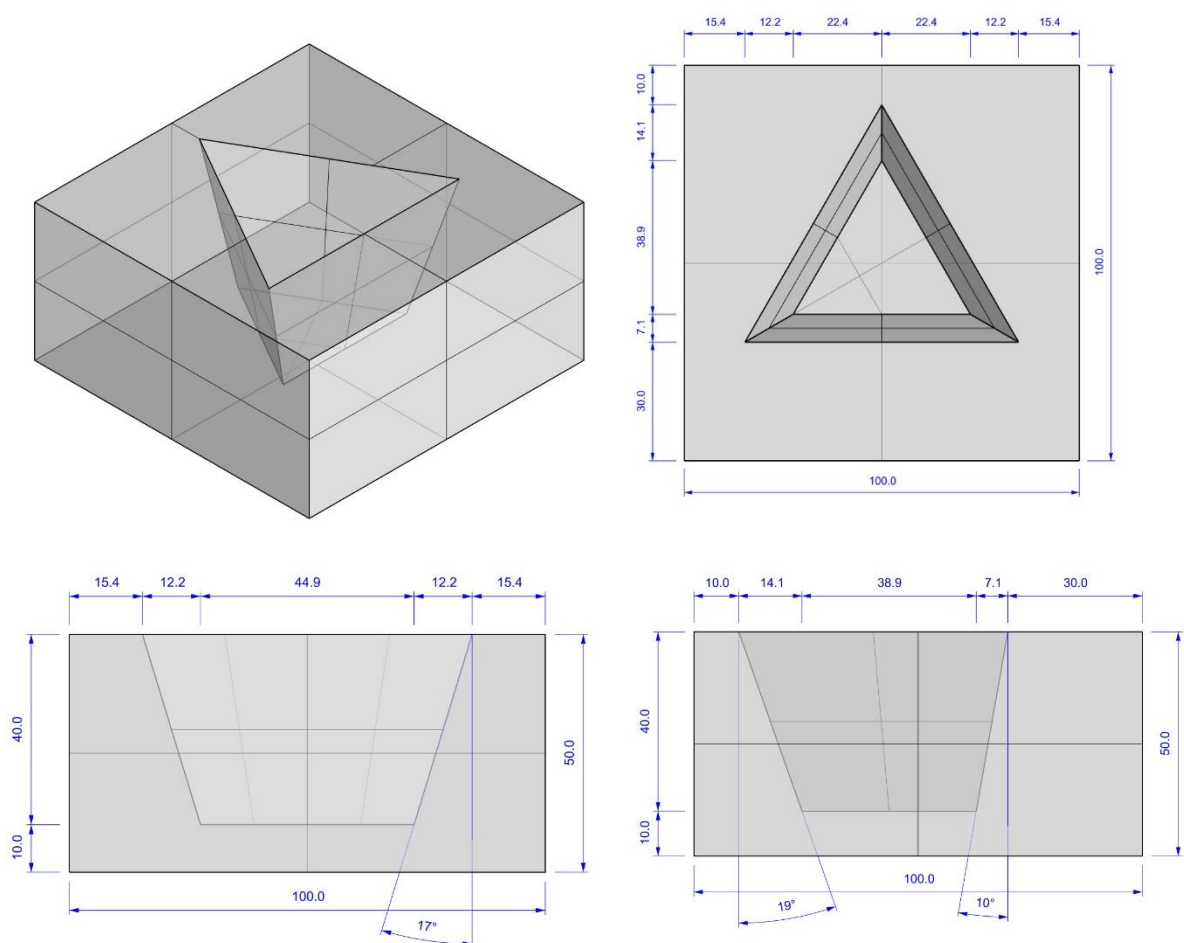


Formenbaustein Nr. 3.13 – Positiver dreiseitiger Pyramidenstumpf



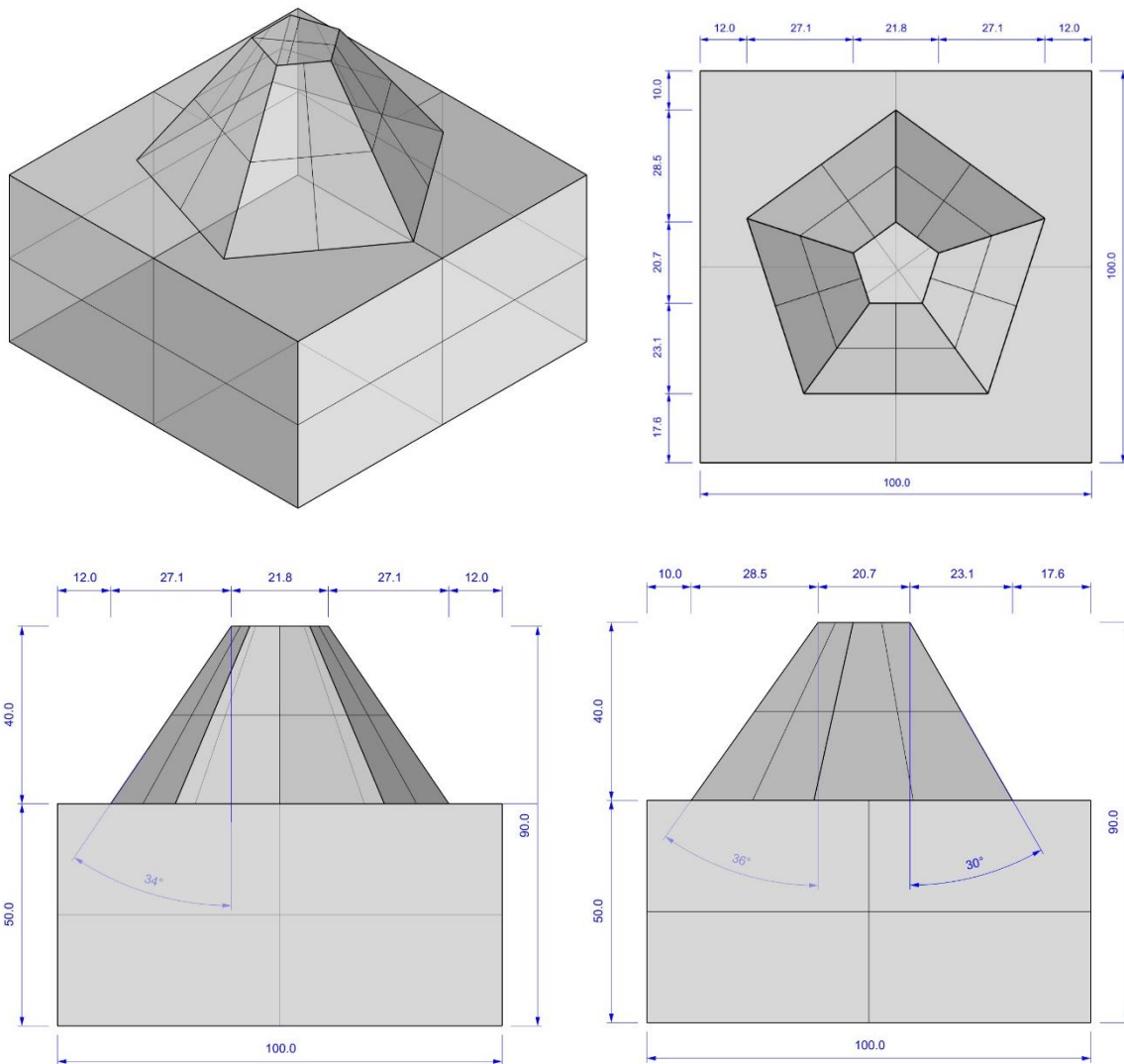


Formenbaustein Nr. 3.14 – Negativer dreiseitiger Pyramidenstumpf

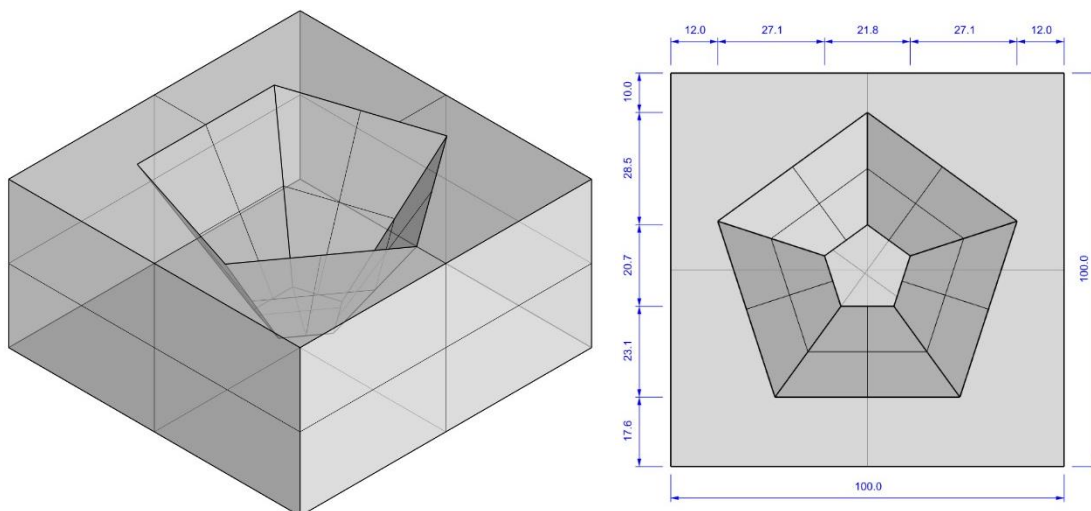


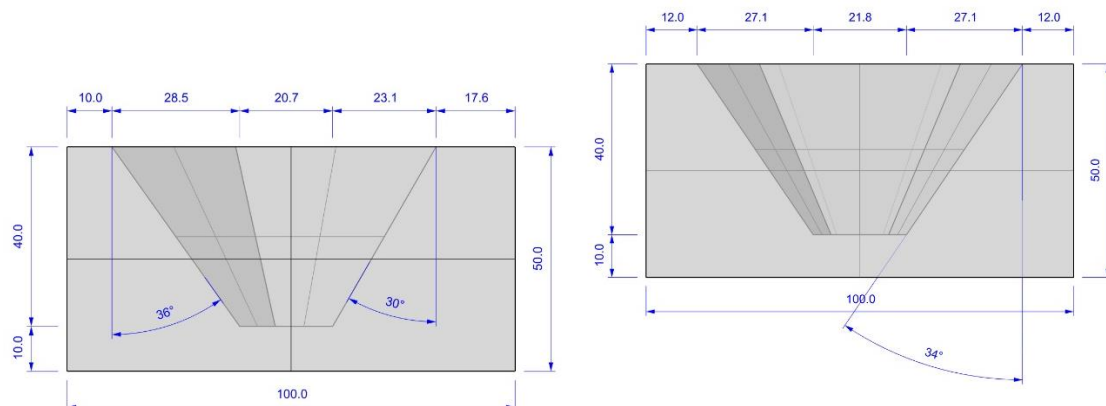


## Formenbaustein Nr. 3.19 – Positiver fünfseitiger Pyramidenstumpf

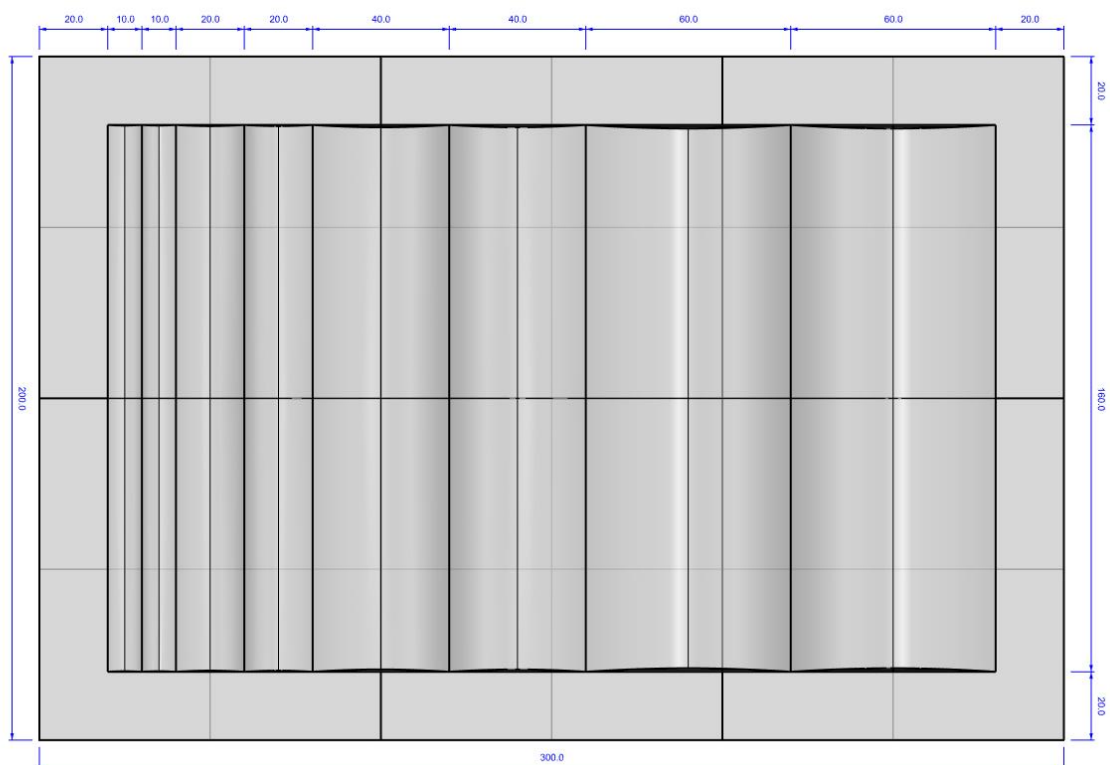
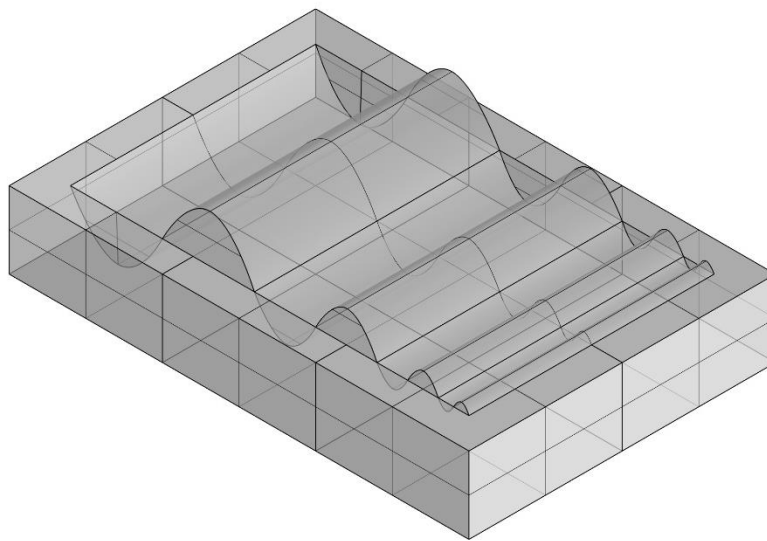


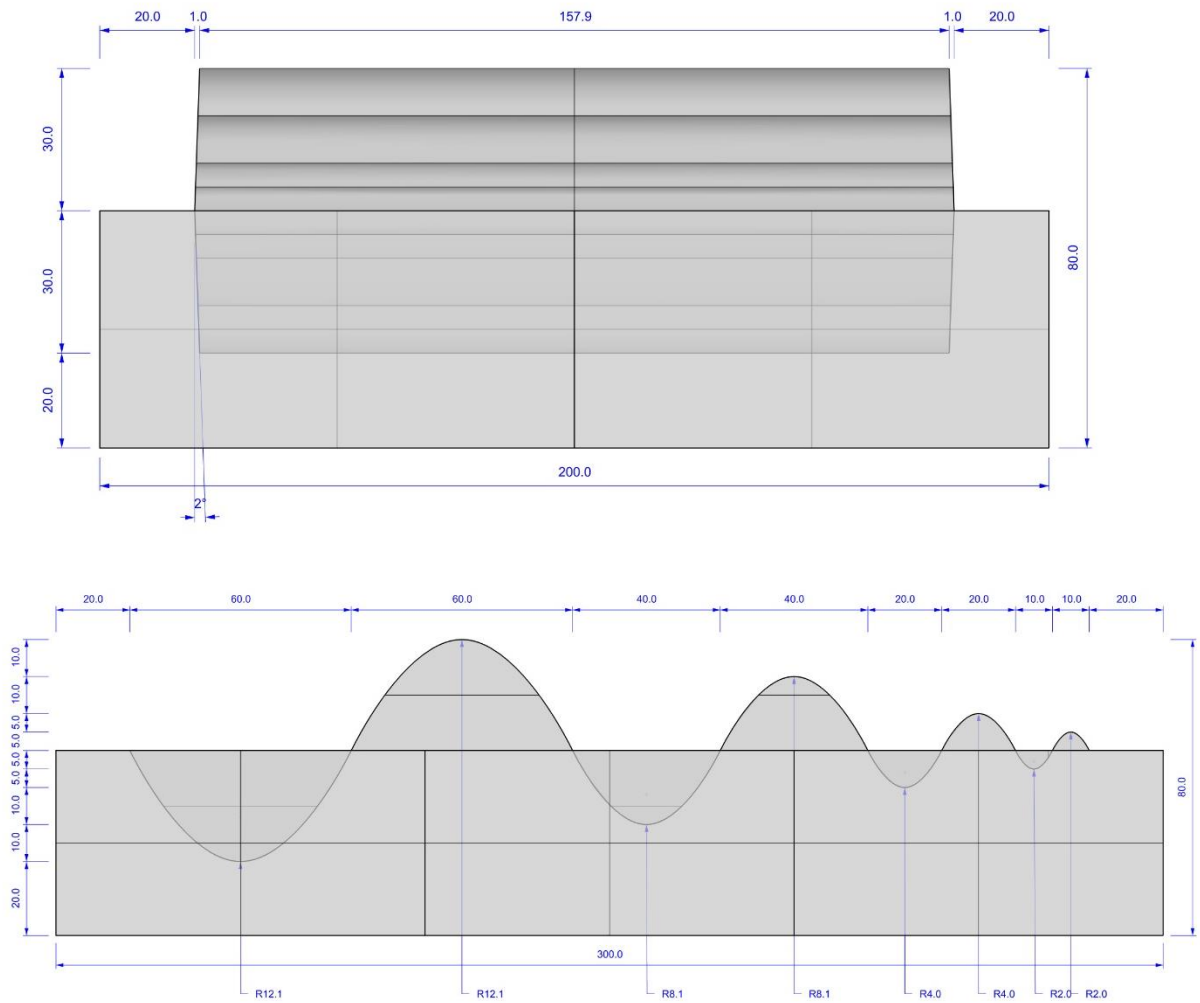
## Formenbaustein Nr. 3.20 – Negativer fünfseitiger Pyramidenstumpf



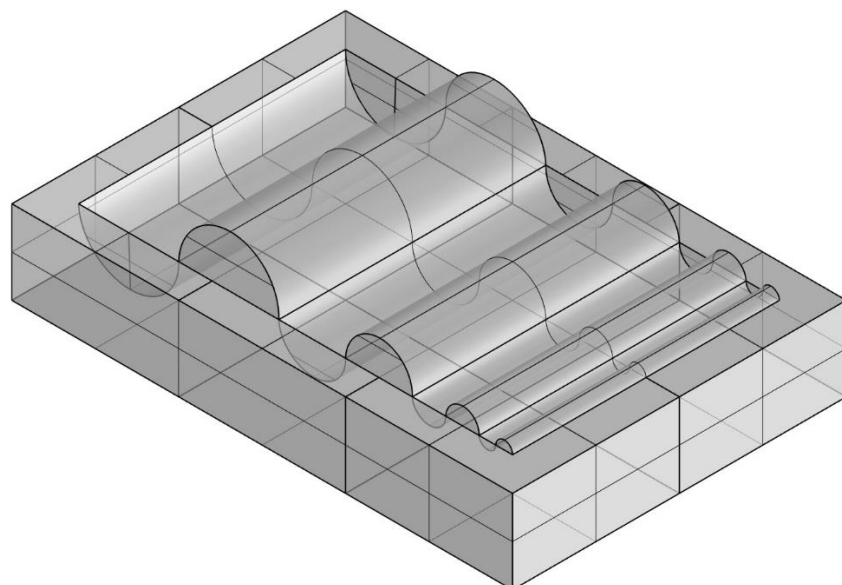


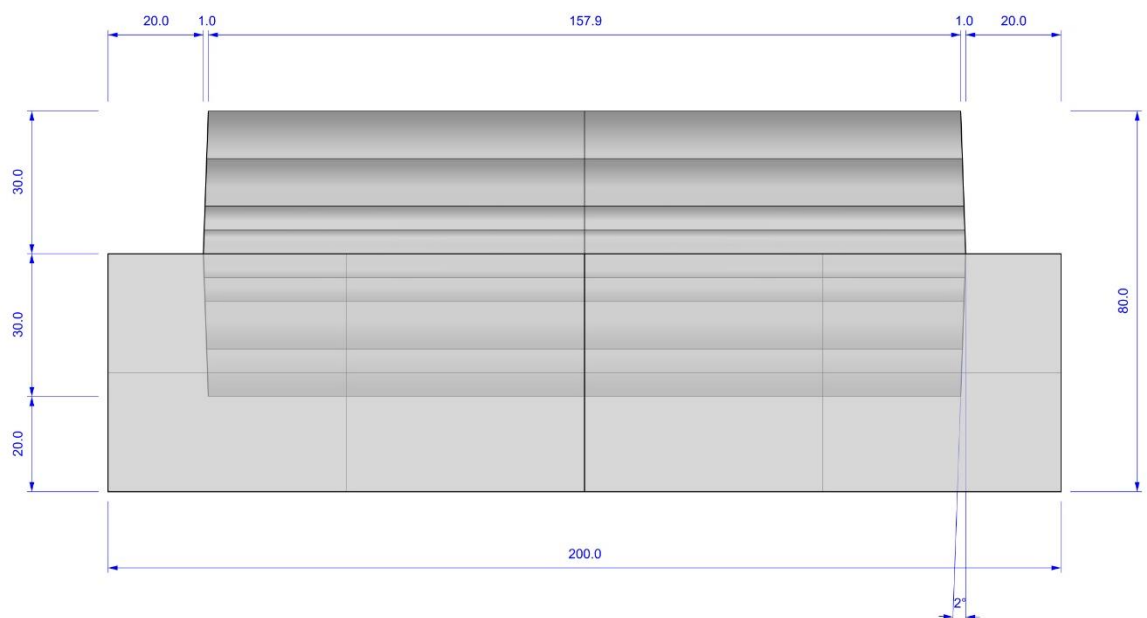
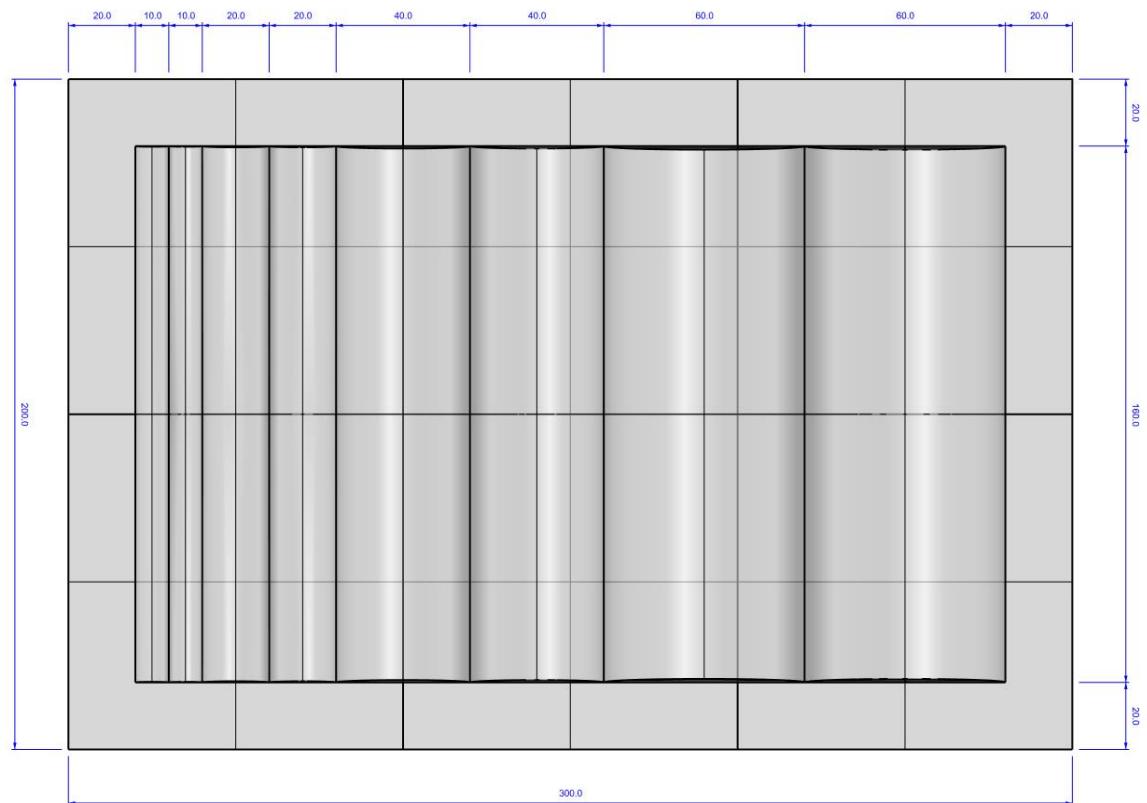
Formenbaustein Nr. 4.1 – Einsinnig parabelförmig gekrümmte Fläche

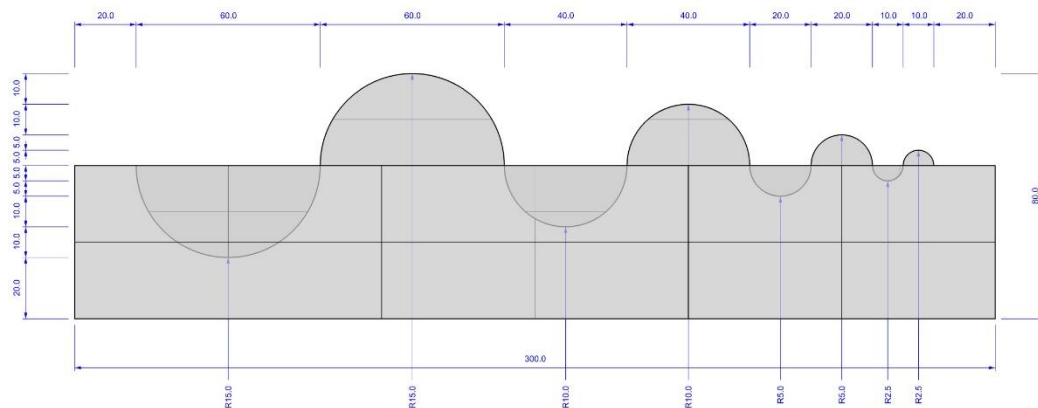




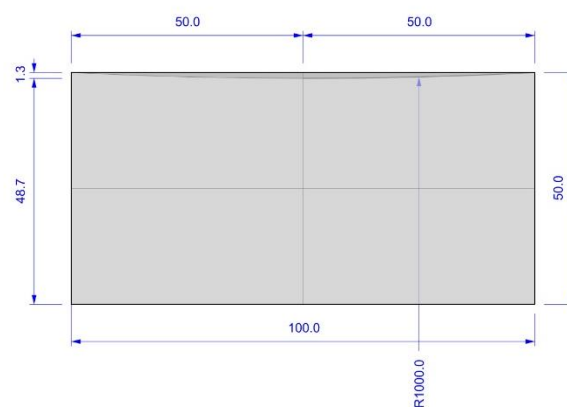
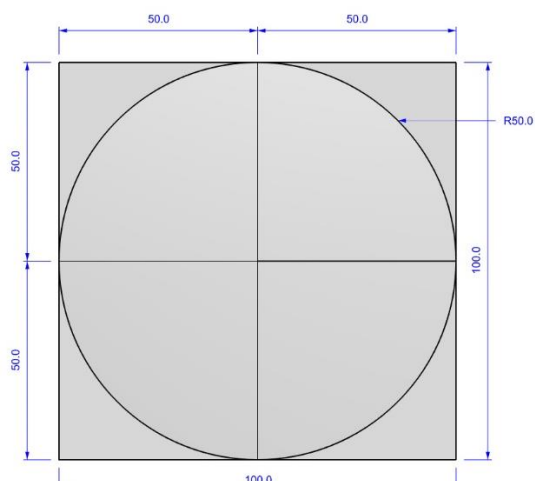
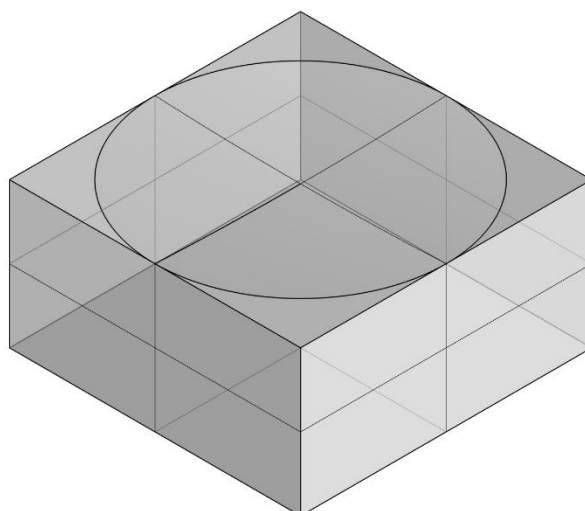
Formenbaustein Nr. 4.2 – Einsinnig radial gekrümmte Fläche





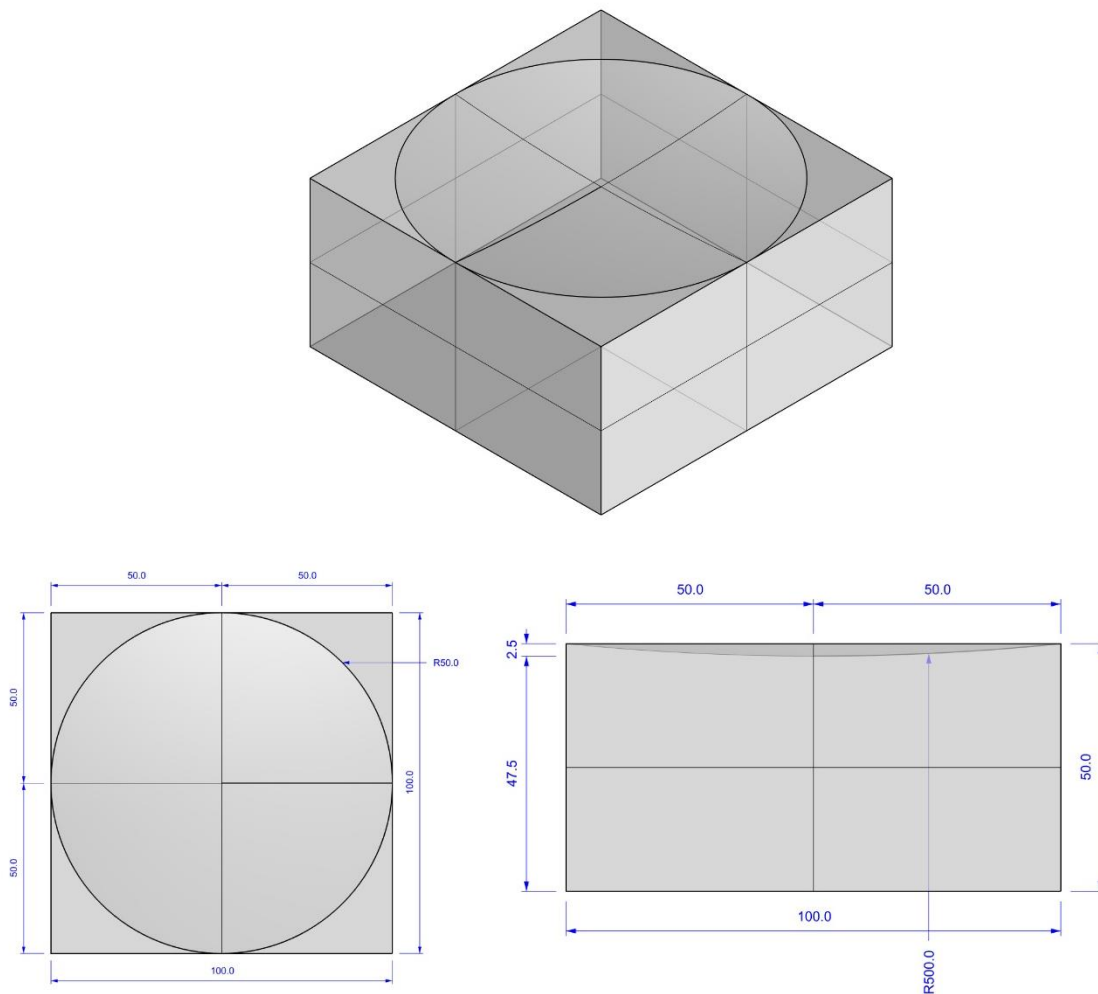


Formenbaustein Nr. 5.2 – Negativ zweisinnig radial gekrümmte Fläche, Krümmungsradius 1.000 mm

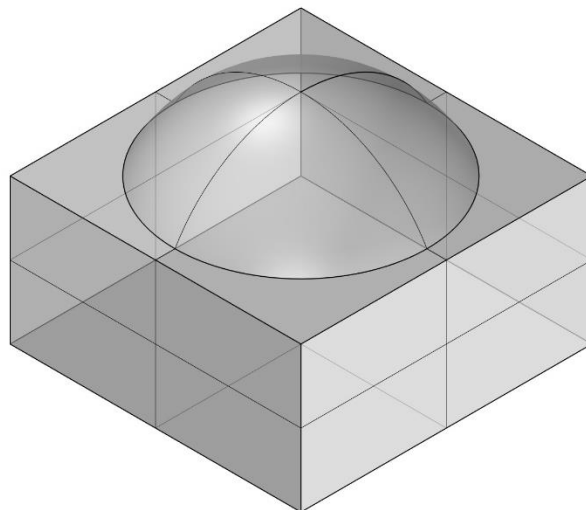


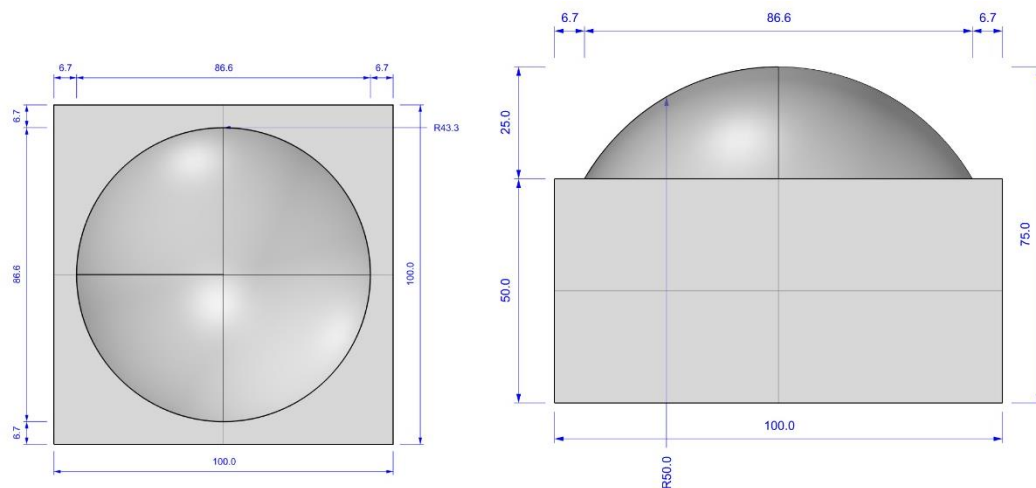


Formenbaustein Nr. 5.4 – Negativ zweisinnig radial gekrümmte Fläche, Krümmungsradius 500 mm

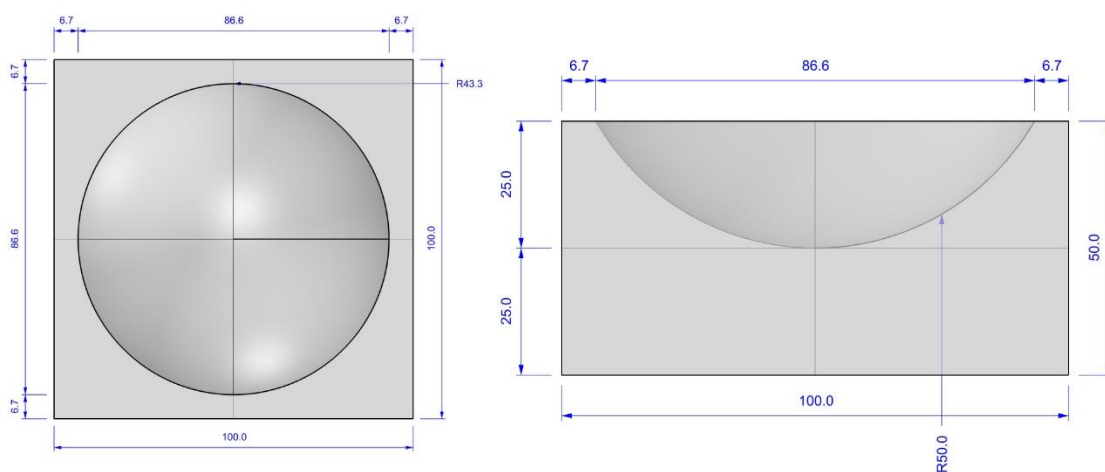
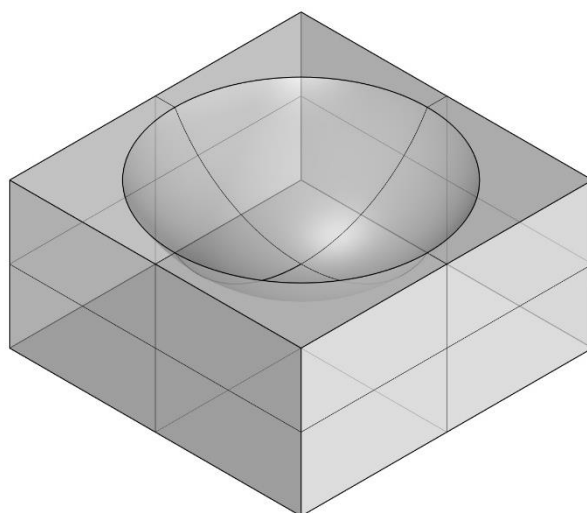


Formenbaustein Nr. 5.5 – Positiv zweisinnig radial gekrümmte Fläche, Krümmungsradius 50 mm

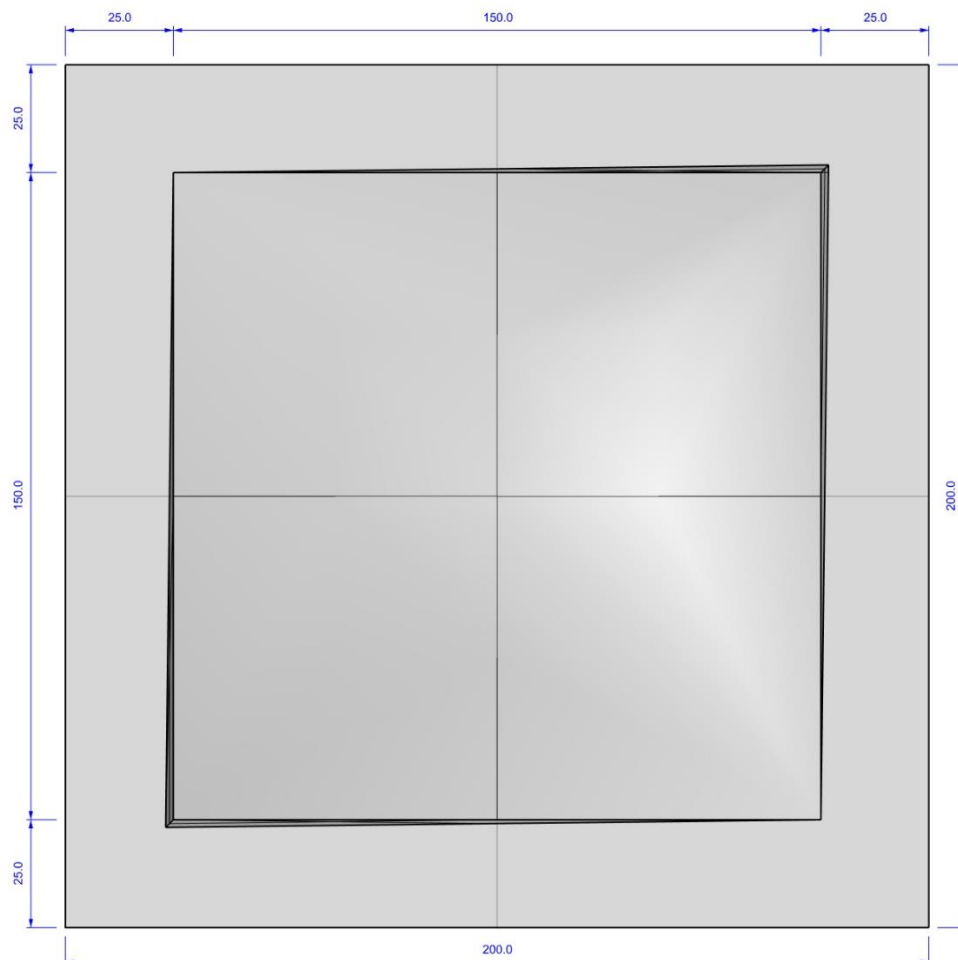
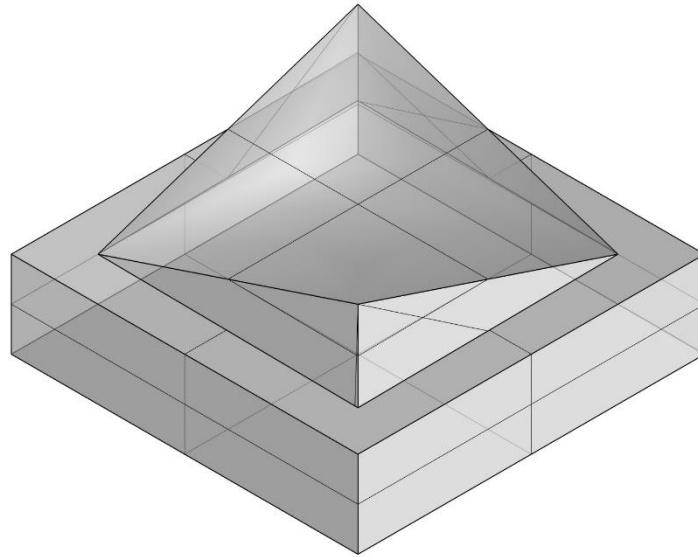


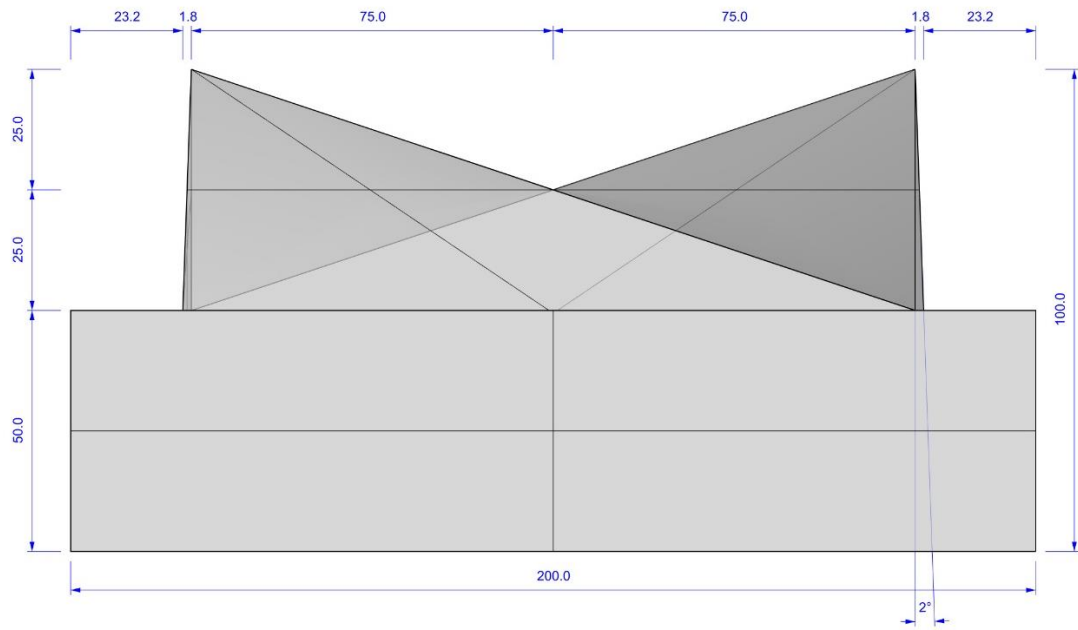


Formenbaustein Nr. 5.6 – Negativ zweisinnig radial gekrümmte Fläche, Krümmungsradius 50 mm

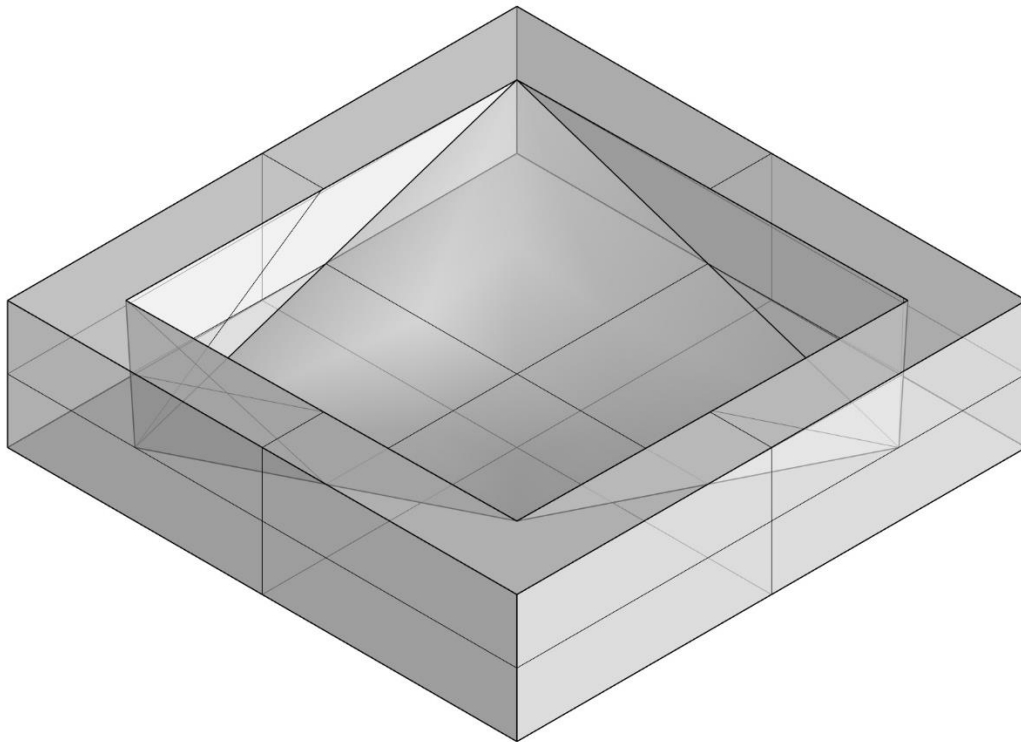


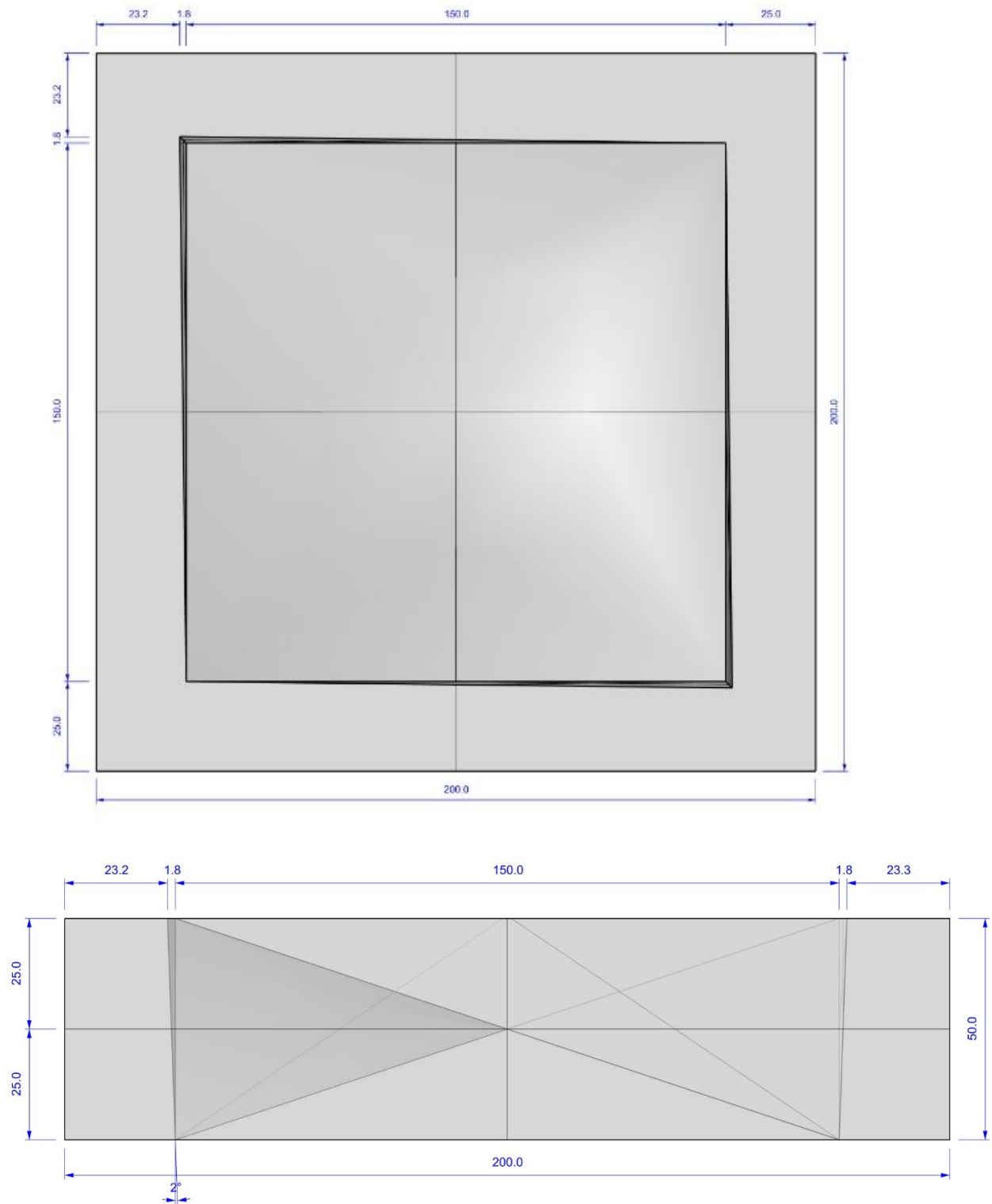
Formenbaustein Nr. 6.9 – Positive zweiachsig hyperbolisch gekrümmte Fläche mit Entformungswinkel  $2^\circ$





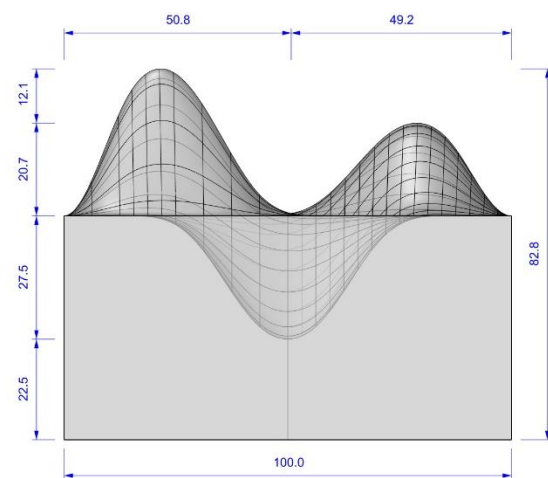
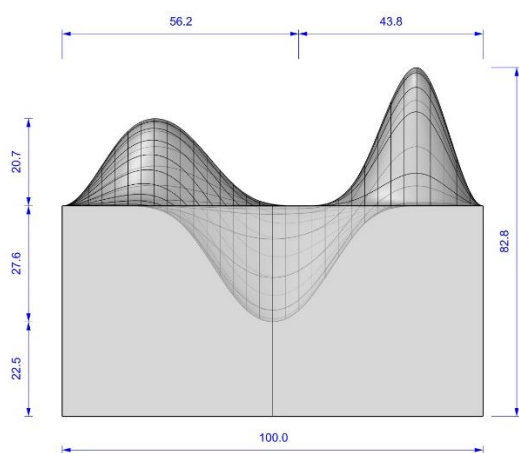
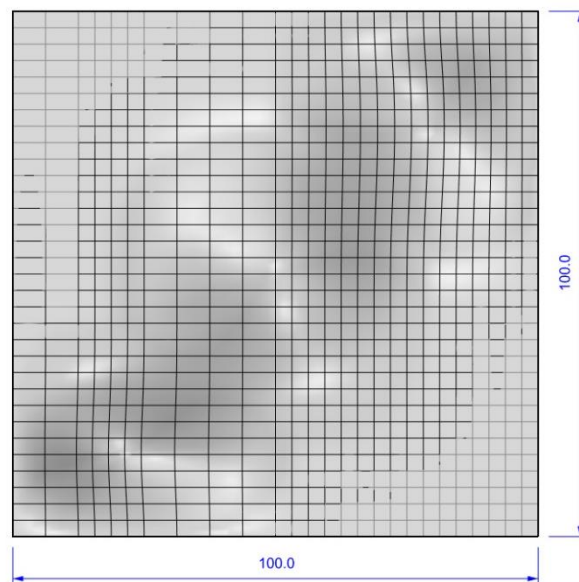
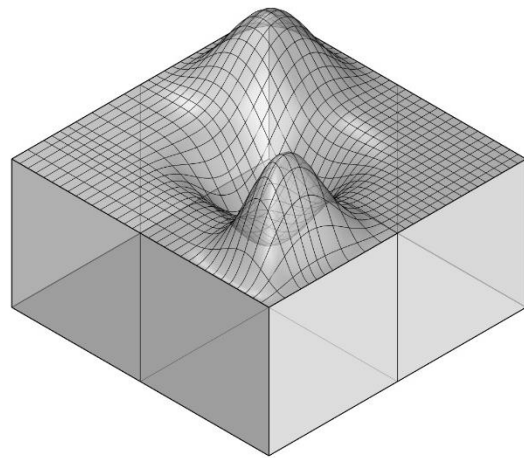
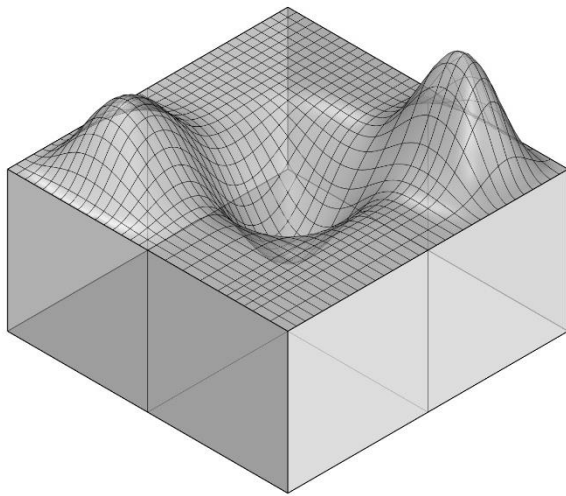
Formenbaustein Nr. 6.10 – Negativ zweiachsig hyperbolisch gekrümmte Fläche mit Entformungswinkel  $2^\circ$



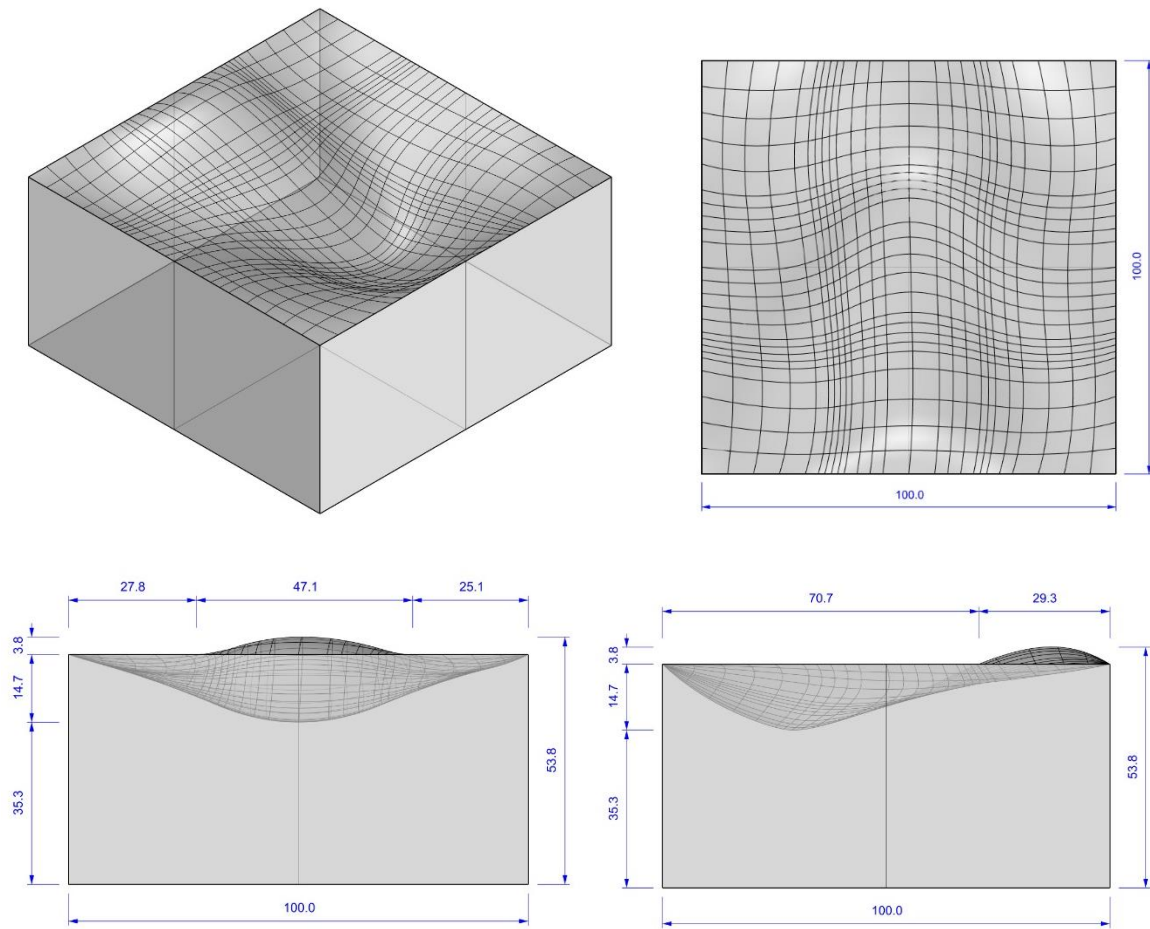




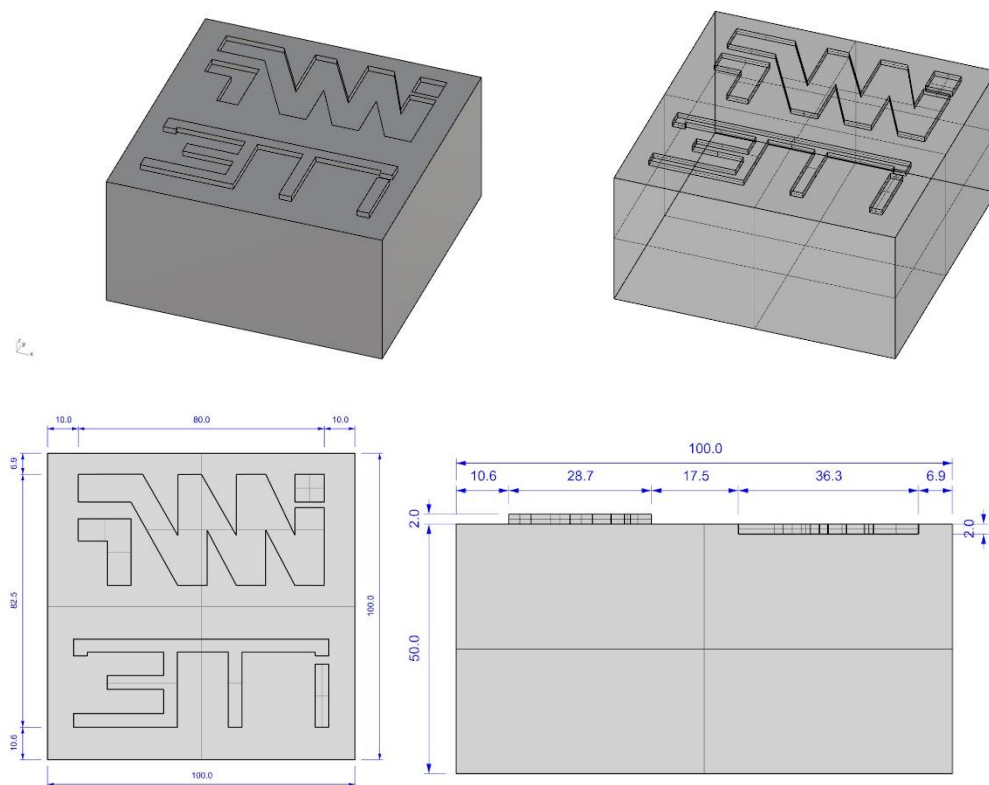
## Formenbaustein Nr. 7.2 – Stark gekrümmte Freiformfläche



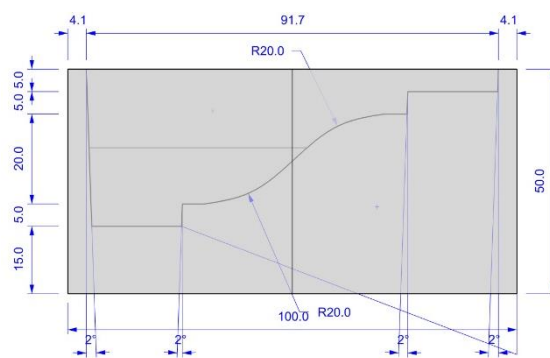
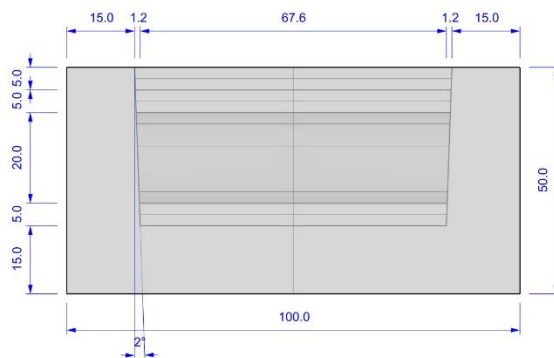
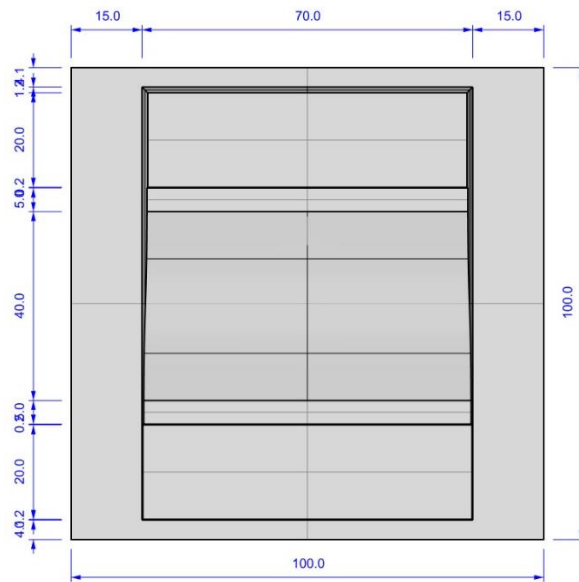
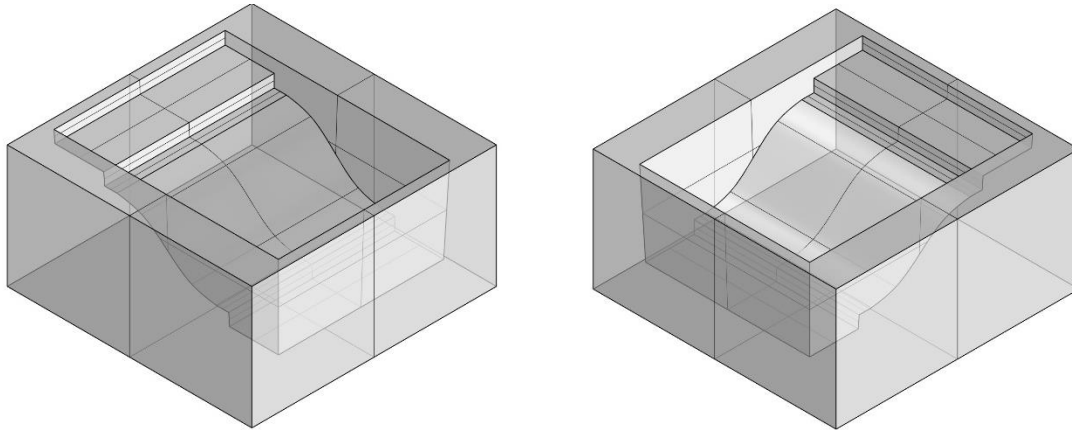
## Formenbaustein Nr. 7.6 – Schwach gekrümmte Freiformfläche



## Formenbaustein Nr. 8.3 – Invertiertes Beschriftungselement ohne Entformungswinkel



## Formenbaustein Nr. 9.2 – Historisch inspiriertes Architekturbauteil (Fenstersims)



Formenbaustein Nr. 12.3 – Negative strukturierte Oberfläche / Ornamentik

